

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN**

**COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA**

**INSTITUTO DE TECNOLOGÍA**

**“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Caracterización del mecanizado de materiales compuestos a partir del análisis de señales de emisión acústica generadas durante el corte (\*)**

**Por Ing. Augusto Bonelli Toro**

**Director**

**Dr. Martín P. Gómez**

**Codirector**

**Ing. Martín R. González Fuster**

**(\*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales***

**República Argentina**

**2019**

# Agradecimientos

A mi madre y mi padre.

A Juan Carricondo, Diego Cowes y Martín Iofrida, por innumerables cosas.

A Axel Canatelli, Ignacio Rychluck y Uriel Sterin, compañeros en la cursada de maestría.

A Martín Gómez, mi director, por el tiempo y la paciencia.

A Martín González Fuster, mi codirector.

A Gerardo R. G. Fernández, Federico N. Antico y Pablo Vogt por su ayuda en el mecanizado de los paneles.

A Sebastián Otero por sus explicaciones y por facilitarme el material para realizar el trabajo.

A Jorge Magallanes por su curso de Cualimetría y Quimiometría que me facilitó realizar gran parte del trabajo y a Ezequiel Morzan que me explicó y ayudó a entender otros algoritmos realizados.

A todo el grupo ICES.

Al Instituto Sabato, en particular a Ricardo Carranza, Manuel Iribarren y Ana Kurcin.

## Resumen

El monitoreo de los procesos de mecanizado es de gran relevancia en la industria, por razones técnico económicas asociadas a la manufactura. Particularmente, la industria aeroespacial tiene requerimientos muy exigentes para la fabricación de sus componentes, lo cual exige procesos de mecanizado de altísima precisión, demandando además sistemas de control de altas prestaciones. Una variable fundamental a evaluar en esos casos es la condición de la herramienta, que debe ser monitorizada de diversas maneras.

El grupo de Ondas Elásticas, CAC, CNEA en el cual se realizó este trabajo, ha abordado esta problemática, estudiando la caracterización de procesos de mecanizado de distintos tipos de materiales, en variadas condiciones, con el método de ensayos no destructivos denominado Emisión Acústica.

En el presente trabajo, se evalúan por este método las variables que intervienen en el mecanizado de una estructura tipo sándwich de uso aeroespacial.

En primer lugar, se estudió la propagación de las ondas en el material generando fuentes simuladas de ondas elásticas monopolares de banda ancha por medio del método de Hsu Nielsen y se analizaron distintas propiedades como la atenuación, la velocidad y la direccionalidad de la propagación. También se estudió el coeficiente de atenuación genuina del material en función de la frecuencia para distintas orientaciones del panel. Luego, se realizaron ensayos de agujereado y fresado con una máquina de control numérico computarizado (CNC) para encontrar y clasificar etapas características del mecanizado mediante el procesamiento de los parámetros característicos de las señales de Emisión Acústica. Por otro lado, se utilizaron herramientas de agujereado con diferente desgaste para estudiar el impacto sobre el proceso mediante el procesamiento de los parámetros obtenidos. Ambos análisis se realizaron utilizando técnicas de aprendizaje de máquina tales como Análisis por Componentes Principales, Incrustación Estocástica de Vecinos y Mapas Auto-Organizados, logrando la clasificación buscada de las etapas del mecanizado, así como de los diferentes niveles de desgaste de las herramientas. Durante este trabajo se desarrolló y perfeccionó un software de procesamiento de señales con el cual se analizaron las mediciones de Emisión Acústica.

**Palabras clave:** Emisión Acústica, materiales compuestos, estructura tipo sándwich, aprendizaje de máquina, mecanizado

## Abstract

The monitoring of the machining processes is of great relevance in the industry, for technical economic reasons associated with manufacturing. In particular, the aerospace industry has very demanding requirements for the construction of its components, which requires very high precision machining processes, demanding high performance control systems. A fundamental variable to evaluate is the condition of the tool, which must be monitored in different ways.

The group of Elastic Waves, CAC, CNEA where this work was carried out, has addressed this problem, studying the characterization of machining processes of different types of materials, in several conditions, with the non-destructive testing method called Acoustic Emission.

In the present work, the variables that intervene in the machining of a sandwich type structure for aerospace use are evaluated by this method.

In first place, the propagation of the waves in the material was studied, generating simulated wideband sources of monopolar elastic waves by means of the Hsu Nielsen method and different properties such as attenuation, velocity and directionality of the propagation were analyzed. The coefficient of genuine attenuation of the material as a function of frequency was also studied for different orientations of the panel.

Then, drilling and milling tests were carried out with a computerized numerical control (CNC) machine to find and classify machining characteristic stages by processing the parameters of Acoustic Emission signals. On the other hand, tools with different wear were used to study the impact on the procedure by processing the parameters obtained. Both analyzes were carried out using machine learning techniques such as Analysis by Main Components, Stochastic Neighbors Embedding and Self-Organized Maps, achieving the desired classification of the machining stages, as well as the different levels of wear of the tools. During this work, a signal processing software was developed and perfected with which the Acoustic Emission measurements were analyzed.

**Keywords:** Acoustic Emission, composite materials, sandwich structure, machine learning, machining

## **Presentaciones en congresos**

- A. Bonelli Toro, M. R. Gonzalez Fuster, M. Gómez, “Caracterización de la propagación de ondas elásticas en estructuras tipo sándwich”, Actas COMAT 2018. VII International Conference on Composite Materials.
- A. Bonelli Toro, M. R. Gonzalez Fuster, M. Gómez, “Estudio de la propagación de ondas elásticas en estructuras tipo sándwich”, Actas JAAS 2018. Jornadas de Acústica, Audio y Sonido UNTREF.
- A. Bonelli Toro, M. R. Gonzalez Fuster, M. Gómez, “Estudio de la emisión acústica producida durante el maquinado de compuestos tipo sándwich”. Actas SAM/CONAMET 2018. Congreso internacional en Ciencia y Tecnología de metalurgia y materiales.

# Índice

|  |    |
|--|----|
| Abreviaturas y definiciones.....   | 1  |
| Introducción .....   | 2  |
| Objetivos generales y específicos.....   | 3  |
| Objetivos generales .....  | 3  |
| Objetivos específicos .....  | 3  |
| Estructura del trabajo .....   | 5  |
| Capítulo 1: Materiales compuestos .....  | 7  |
| 1.1. Estructura tipo Sándwich.....   | 9  |
| Capítulo 2: Procesos de mecanizado de materiales compuestos.....                   | 11 |
| 2.1. Agujereado de materiales compuestos.....                                      | 11 |
| 2.1.1. Conceptos generales .....   | 11 |
| 2.2. Aproximaciones para el análisis del mecanizado y la formación de viruta ..... | 13 |
| 2.3. Formación de viruta .....   | 14 |
| 2.4. Estrategia de mecanizado para estructuras sándwich .....                      | 17 |
| 2.4.1. Procedimiento de mecanizado .....   | 18 |
| 2.5. Desgaste de la herramienta.....   | 19 |
| 2.5.1. Tipos de desgaste .....   | 20 |
| 2.5.2. Desgaste de la herramienta en los materiales compuestos .....               | 20 |
| 2.5.3. Herramientas recubiertas de carburo y su desgaste.....                      | 20 |
| Capítulo 3: Introducción a las ondas elásticas y a la Emisión Acústica.....        | 22 |
| 3.1. Propagación de ondas elásticas .....  | 22 |
| 3.2. Ondas en volumen .....  | 22 |
| 3.2.1. Ondas P y S .....   | 22 |
| 3.3. Ondas en superficie.....  | 23 |
| 3.3.1. Ondas de Rayleigh.....  | 23 |
| 3.3.2. Ondas de Love .....   | 24 |
| 3.4. Ondas guiadas.....  | 25 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| 3.4.1.      | Ondas de Lamb .....  | 25 |
| 3.5.        | Atenuación de las ondas elásticas.....   | 26 |
| 3.6.        | Emisión Acústica.....  | 27 |
| 3.6.1.      | Partes constitutivas de un equipo de EA.....                                       | 27 |
| 3.6.2.      | Parámetros de EA.....  | 30 |
| 3.6.3.      | Tipos de señales.....  | 32 |
| 3.6.4.      | Hsu Nielsen .....  | 32 |
| Capítulo 4: | Aprendizaje de máquina y algoritmos de reducción dimensional .....                 | 34 |
| 4.1.        | Análisis por Componentes Principales .....   | 34 |
| 4.2.        | Incrustación Estocástica de Vecinos .....  | 35 |
| 4.3.        | Redes Neuronales .....   | 36 |
| 4.3.1.      | Mapas auto-organizados.....  | 38 |
| Capítulo 5: | Caracterización de la propagación de onda sobre una estructura tipo sándwich ..... | 43 |
| 5.1.        | Mediciones de la velocidad de propagación y de la atenuación.....                  | 43 |
| 5.1.1.      | Método Experimental.....   | 43 |
| 5.1.2.      | Resultados y Discusión .....   | 44 |
| 5.2.        | Atenuación en función de la frecuencia.....  | 46 |
| 5.2.1.      | Método experimental .....  | 46 |
| 5.2.2.      | Resultados y Discusión .....   | 47 |
| 5.3.        | Isotropía.....   | 48 |
| 5.3.1.      | Método experimental .....  | 48 |
| 5.3.2.      | Resultados y Discusión .....   | 49 |
| Capítulo 6: | Caracterización de las etapas del proceso de mecanizado con EA .....               | 50 |
| 6.1.        | Método Experimental.....   | 50 |
| 4.3.2.      | Procesamiento de datos.....  | 54 |
| 6.2.        | Resultados y Discusión .....   | 55 |
| 6.2.1.      | Componentes Principales para la clasificación de etapas.....                       | 56 |
| 6.2.2.      | Incrustación estocástica de vecinos para la clasificación de etapas.....           | 60 |

|   |    |
|---|----|
| 6.2.3. Mapas auto-organizados para la clasificación de etapas.....                  | 63 |
| Capítulo 7: Caracterización de distintos grados de desgaste de la herramienta ..... | 69 |
| 7.1. Método Experimental.....   | 69 |
| 7.2. Resultados y Discusión .....   | 72 |
| 7.2.1. Análisis de la Potencia Media en función del desgaste .....                  | 74 |
| 7.2.2. Clasificación del desgaste a partir de PC .....                              | 80 |
| 7.2.3. Incrustación estocástica de vecinos para la clasificación del desgaste ..... | 83 |
| 7.2.4. Análisis del desgaste mediante mapas de Kohonen .....                        | 86 |
| Capítulo 8: Conclusiones.....   | 90 |
| Trabajo a futuro .....  | 92 |
| Referencias.....  | 93 |
| Apéndice A: Desarrollo de la interfaz e EA para el análisis de señales .....        | A1 |
| A.1. Manejo de los datos.....   | A1 |
| A.1.1. Parámetros de EA .....   | A1 |
| A.1.2. Formas de onda .....   | A1 |
| A.2. Módulo de gráficos.....  | A2 |
| A.3. Procesamiento de las formas de onda.....                                       | A4 |
| A.3.1. Implementación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).....               | A4 |
| A.3.2. Implementación de la Transformada de Onditas (TO) .....                      | A6 |
| A.4. Desarrollo de la interfaz de usuario .....                                     | A7 |

# Abreviaturas y definiciones

|              |  |
|--------------|--|
| <b>CMC</b>   | Matriz metálica                        |
| <b>CMC</b>   | Matriz cerámica                        |
| <b>CVD</b>   | Deposición química de vapor            |
| <b>CFRP</b>  | Polímero reforzado de fibra de carbono |
| <b>EA</b>    | Emisión acústica                       |
| <b>FO</b>    | Forma de onda                          |
| <b>GFRP</b>  | Polímero reforzado de fibra de vidrio  |
| <b>HU</b>    | Herramienta Usada                      |
| <b>HN</b>    | Herramienta Nueva                      |
| <b>MMPM</b>  | Media móvil de la potencia media       |
| <b>PMC</b>   | Matriz polimérica                      |
| <b>PC</b>    | Componente Principal                   |
| <b>PCA</b>   | Análisis por Componentes Principales   |
| <b>PVD</b>   | Deposición física de vapor             |
| <b>RPM</b>   | Revoluciones Por Minuto                |
| <b>SNE</b>   | Incrustación estocástica de vecinos    |
| <b>SOM</b>   | Mapa auto-organizado                   |
| <b>VMPPM</b> | Varianza móvil de la potencia media    |

# Introducción

Los métodos de monitoreo y control de los procesos de mecanizado para la manufactura son esenciales en industrias de altísima exigencia como las aeroespacial y aeronáutica. Para poder adecuarse a los estándares de calidad y hacer estos procesos más eficientes, estos métodos se encuentran en permanente mejora. Hay diversas maneras de monitorear el estado de las herramientas, usualmente clasificados como métodos directos e indirectos. Los directos son los que evalúan su condición mediante la inspección de su geometría a partir de técnicas basadas en cámaras y microscopios. Entre los métodos indirectos que permiten inferir el estado de la herramienta se pueden mencionar por ejemplo, los basados en el estudio de las vibraciones mecánicas, la corriente consumida por la máquina, el torque, la fuerza de avance, y las señales de Emisión Acústica (EA) generadas durante el proceso de mecanizado, siendo todos estos métodos aplicables a tiempo real.

Respecto de la EA en la literatura, se muestran estudios para diferentes operaciones de mecanizado como agujereado, fresado y torneado, sobre todo en materiales metálicos. Dado el uso creciente de los materiales compuestos, en los últimos años se ha impulsado el estudio de la EA producida en este tipo de materiales. Por un lado, en el estudio del comportamiento mecánico en ensayos de tracción, flexión y fatiga. Por otro lado, en la caracterización de procesos de mecanizado de estos materiales. La complejidad del estudio de la EA en los compuestos radica en su alto grado de anisotropía y el carácter dispersivo de la propagación de las ondas, lo cual dificulta su instrumentación.

En el presente trabajo, se estudia la factibilidad de la aplicación del método de EA en el monitoreo de herramientas durante el mecanizado de materiales compuestos. Las probetas utilizadas son de estructura tipo sándwich con caras de polímero reforzado de fibra de carbono (CFRP) y núcleo de panal de abeja de aluminio. Para este estudio se utilizó un equipo de EA y se desarrollaron una serie de algoritmos e interfaces gráficas, en el lenguaje de programación Python, para realizar el procesamiento de las señales obtenidas.

En la primera etapa, se estudiaron sobre las probetas tipo sándwich la atenuación de las ondas elásticas en función de la distancia y la frecuencia, la velocidad de propagación y el patrón polar. Para esto se utilizó el método Hsu-Nielsen produciendo fuentes de EA simuladas monopolares.

Posteriormente se utilizó la EA para evaluar el proceso de mecanizado. En primer lugar, discriminando las etapas de corte y luego, clasificando la condición de las herramientas.

Ambos análisis se hicieron mediante la implementación de una serie de algoritmos de aprendizaje de máquina tales como análisis por componentes principales, incrustación estocástica de vecinos y mapas auto-organizados de Kohonen.

Los resultados obtenidos muestran el uso de las señales de EA para clasificar las etapas del proceso de mecanizado y determinar el grado de desgaste de la herramienta. La implementación del método de EA en la industria permitiría, por un lado, poner a punto los procesos de mecanizado previo a la fabricación de los componentes funcionales y por otro, obtener información del mecanizado en tiempo real detectando fenómenos de degradación y permitiendo actuar en consecuencia.

## **Objetivos generales y específicos**

### **Objetivos generales**

En este trabajo se apunta al avance en la metodología de medición y análisis que permita inferir el estado del proceso de mecanizado sobre paneles tipo sándwich de aplicación aeroespacial. En particular, se estudian los procesos de agujereado y fresado para su puesta a punto. Para esta tarea, se realizan diversos análisis con algoritmos que permiten la clasificación de la señal producida durante el mecanizado.

### **Objetivos específicos**

- Relevamiento bibliográfico sobre el método de EA, el proceso de mecanizado de materiales compuestos y la aplicación de la EA para la caracterización de estos materiales.
- Caracterizar distintas propiedades de los materiales en estudio. como la velocidad de propagación, la atenuación y el grado de isotropía con el que se propagan las ondas.
- Diseñar experimentos que permitan la repetitividad de los ensayos de mecanizado.
- Realización de los ensayos de mecanizado en las condiciones planificadas, midiéndose la EA.
- Desarrollar una serie de algoritmos que permitan clasificar las distintas etapas de mecanizado producidas por la señal de EA sobre el material, así como el desgaste de la herramienta (comparando entre las mismas etapas).

- Uso de los algoritmos para la obtención de resultados sobre la condición de las herramientas y de las etapas del corte a partir de las señales de EA medidas durante los ensayos de mecanizado.
- Obtención de conclusiones sobre lo estudiado

## Estructura del trabajo

El presente trabajo se divide en siete capítulos. Los primeros cuatro constituyen el marco teórico del trabajo y los últimos tres corresponden a los distintos desarrollos realizados a lo largo del trabajo.

El **Capítulo 1: Materiales compuestos** trata acerca de generalizades de los materiales compuestos, su clasificación y sus ventajas. Se puntualiza sobre la estructura tipo sándwich y las características de su manufactura.

El **Capítulo 2: Procesos de Corte** aborda los procesos de corte asociados utilizados sobre materiales compuestos, realizando una descripción escueta de la física involucrada en el proceso de corte de los mismos. A su vez se describe la interacción entre el tipo de herramienta utilizada en este desarrollo y su interacción con materiales compuestos de matriz polimérica.

En el **Capítulo 3: Introducción a las ondas elásticas y a la Emisión Acústica** se desarrolla la física de la propagación de las ondas elásticas, relatando cuáles son los tipos de ondas que se propagan en un medio sólido (P, S, R) y cómo afecta la geometría del mismo, pudiendo producir ondas tipo Lamb en geometrías tipo placa. Luego, se resumen los conceptos fundamentales involucrados en el método de Emisión Acústica como las partes constitutivas de un equipo, los tipos de adquisición que éste puede realizar, los tipos de formas de onda obtenidas y el método más utilizado para la simulación de fuentes de Emisión acústica conocido como Hsu-Nielsen.

El **Capítulo 4: Aprendizaje de máquina** presenta una breve introducción acerca de tres algoritmos de reducción de variables: el Análisis por Componentes Principales, Incrustación Estocástica de Vecinos y Mapas auto-organizados de Kohonen.

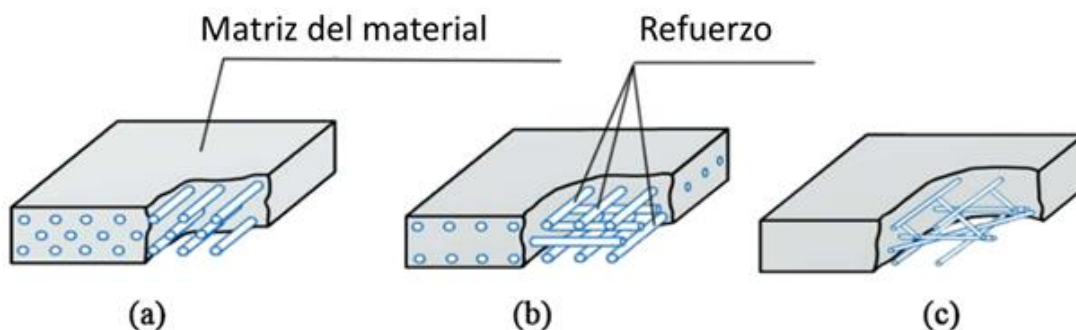
El **Capítulo 5: Caracterización de la propagación de ondas sobre estructura tipo sándwich** es la primera etapa del trabajo en la cual se realizan una serie de mediciones, obteniendo distintas propiedades asociadas al material como la velocidad de propagación, la atenuación y la isotropía del material.

En el **Capítulo 6: Caracterización de las etapas del proceso de corte con EA** se describe el instrumental y los equipos utilizados a lo largo del resto del trabajo y las probetas utilizadas para esta sección. Luego se describe la medición realizada para identificar las distintas etapas del proceso de corte. Para realizarlo se utilizaron las técnicas de reducción de variables desarrolladas en el capítulo 4.

En el Capítulo 7: **Caracterización de distintos grados de desgaste de la herramienta** se describe la última medición realizada. La misma consistió en la caracterización de los 3 tipos distintos de desgaste de herramienta. Para simplificar el análisis se estudió el proceso de agujereado y fresado por separado. Se utilizaron las mismas técnicas de reducción de variables que en el capítulo anterior pero previamente se realizó un análisis a partir del estudio de la varianza y la media de la potencia media.

# Capítulo 1: Materiales compuestos

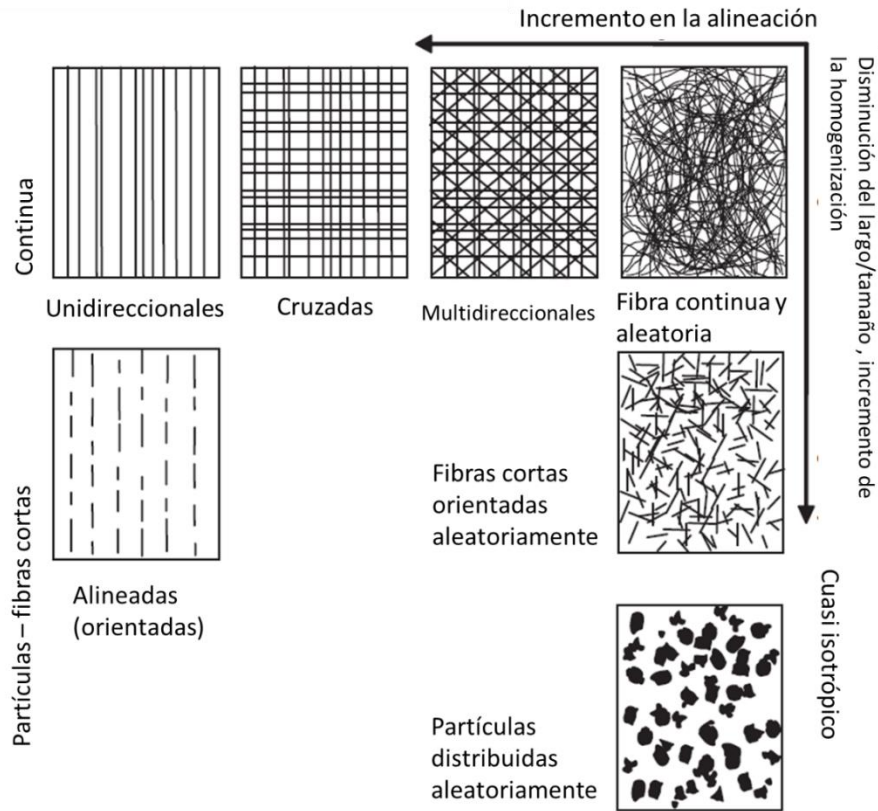
Los materiales compuestos se constituyen de dos o más materiales que usualmente tienen características muy disimiles, conformando un nuevo material con propiedades superiores a los componentes individuales. La mayoría de los compuestos tienen dos partes esenciales, el refuerzo (también llamado agente reforzante o fibra) y la matriz, como se puede observar en la Figura 1. El refuerzo generalmente determina la resistencia y la rigidez del material. Un polímero al cual se le agrega un refuerzo es más resistente en la dirección de la fibra en comparación con el material original. La orientación y el largo del refuerzo determinarán las propiedades mecánicas de este material, su grado de anisotropía y el proceso de manufactura más conveniente. La matriz actúa como elemento de transferencia de carga entre las fibras y protegen la estructura contra condiciones ambientales adversas, como la alta temperatura y la humedad [Nijssen, 2015] [Karataş, 2018].



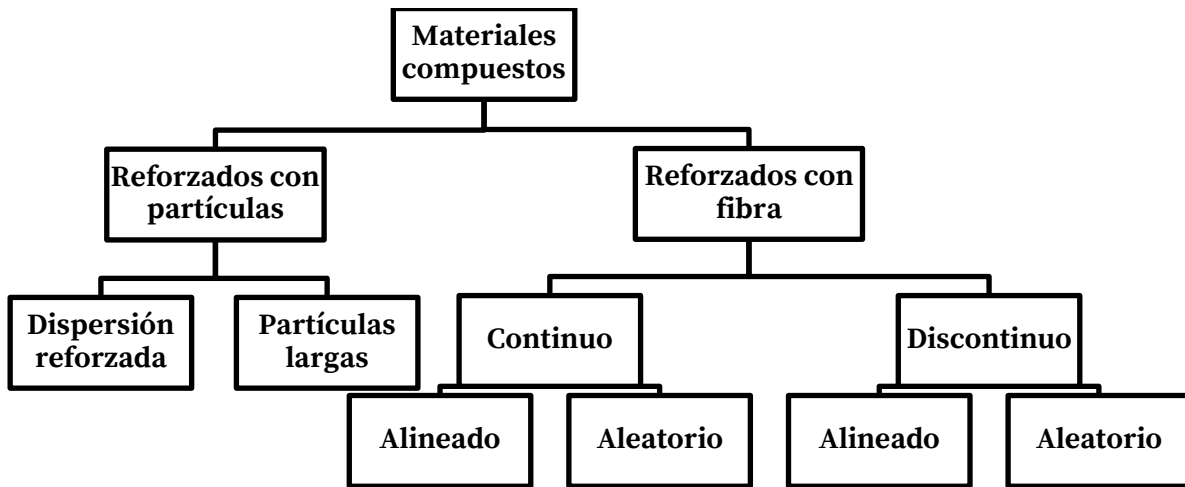
**Figura 1.** Detalle de material compuesto con matriz y refuerzo (a) refuerzo unidireccional, (b) refuerzo entrecruzado, (c) refuerzo aleatorio.

En la Figura 2 se observar que las fibras pueden ser continuas o cortas y dispuestas de manera unidireccional o aleatoria, lo cual le conferirá distintas propiedades mecánicas y una mayor o menor isotropía. La matriz se encuentra embebida en el material de refuerzo, manteniendo sus posiciones relativas.

Hay diversas maneras de clasificar los materiales compuestos. Una es según el tipo de matriz, que puede ser polimérica, metálica o cerámica (PMC, MMC y CMC, respectivamente por sus siglas en inglés) [Hocheng, 2012]. Otra manera es según el tipo de refuerzo como se detalla en la Figura 3. Pueden ser reforzados con partículas y reforzados con fibra.



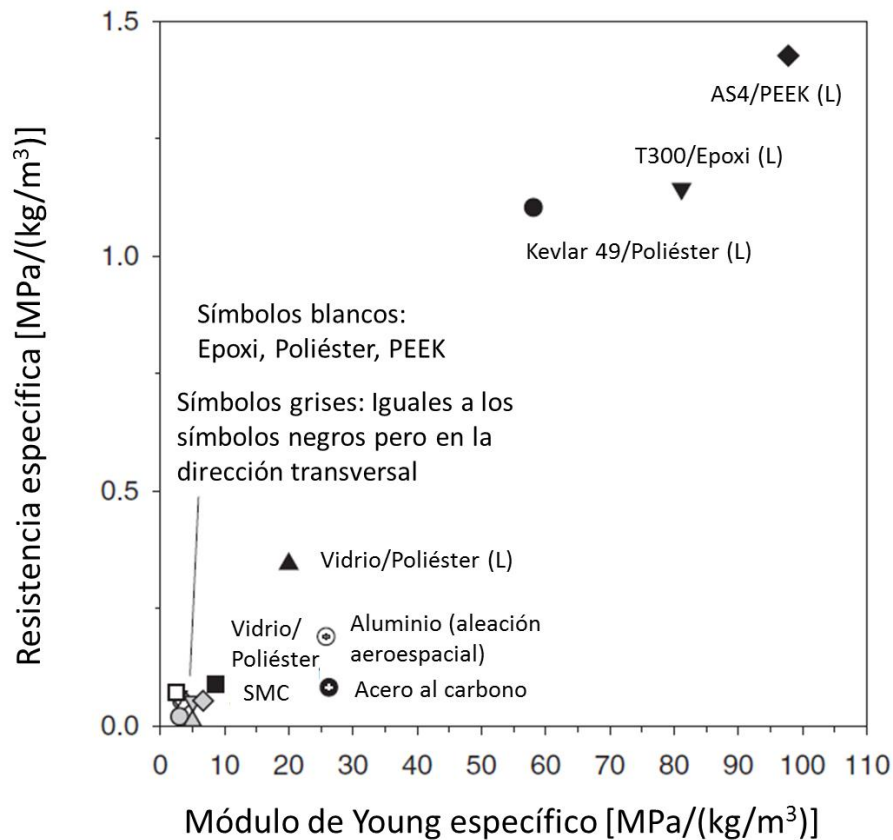
**Figura 2.** Tipos de orientación y tamaño de las fibras y partículas [Sheikh, 2009].



**Figura 3.** Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo.

La utilización de los materiales compuestos se ha incrementado considerablemente en las últimas décadas, en parte a sus ventajas como su resistencia específica, su rigidez específica y su resistencia a la corrosión y a la fatiga, siendo muy utilizados en la

industria aeroespacial, aeronáutica, automotriz y naval [Kalpakjian, 2009]. En la Figura 4 se comparan las resistencias específicas de distintos materiales compuestos en relación con algunos metales [Sheikh, 2009] donde puede observarse que las propiedades específicas de estos últimos se encuentran por debajo.



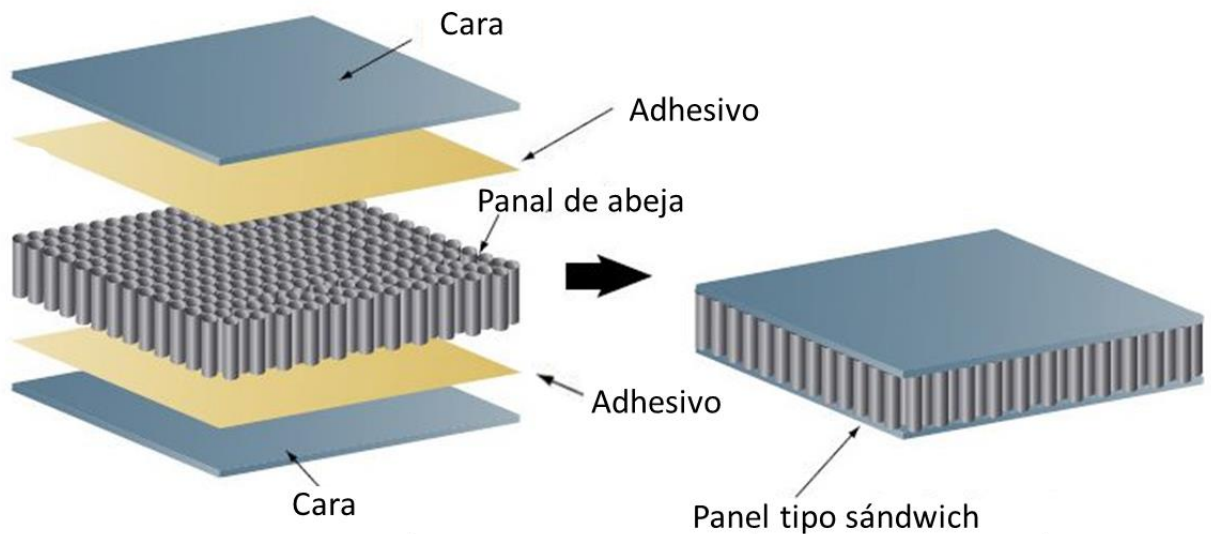
**Figura 4.** Resistencia específica en función del módulo de Young específico [Sheikh, 2009].

Otra de las ventajas de los materiales compuestos radica en la posibilidad de diseñarlos a medida de las necesidades para así satisfacer demandas específicas.

### 1.1. Estructura tipo Sándwich

Las estructuras tipo sándwich con materiales compuestos son utilizadas sobre todo en la industria aeroespacial, debido a su alta resistencia y rigidez específica. [Davies, 2001]. Este material está compuesto por dos láminas delgadas que le confieren dureza y resistencia y un núcleo más grueso pero liviano. Las láminas pueden ser de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) o de fibra de vidrio (GFRP) o alguna aleación metálica de baja densidad como el aluminio. Para el núcleo se utiliza un material de mayor espesor y liviano, que usualmente no tiene una resistencia mecánica alta pero

proporciona a esta estructura una alta rigidez a la flexión con una baja densidad. Los núcleos más utilizados son los del tipo panel de abeja y los materiales pueden ser de los más diversos [Thomsen, 2005]. En la Figura 5 se muestra un esquema de la estructura tipo sándwich, compuesta por un multilaminado de CFRP en sus caras y un núcleo de aluminio (las características particulares del material estudiado se detallarán en el capítulo 5).



**Figura 5.** Estructura tipo sándwich con multilaminado de CFRP en sus caras y un núcleo de aluminio en forma de panel de abeja.

La elaboración de la estructura tipo sándwich es compleja y conlleva varias etapas, involucrando la construcción de los multilaminados planos y la adhesión de estos con el núcleo. Los detalles sobre este proceso se pueden encontrar en [Bitzer, 1997] [Bauer, 2016].

## Capítulo 2: Procesos de mecanizado de materiales compuestos

La mayoría de los materiales compuestos utilizados para la industria aeroespacial son de naturaleza anisotrópica y abrasiva, por lo que requiere que el proceso de mecanizado de estos materiales sea diferente al realizado sobre los metales, ya que hay que evitar que estos materiales se astillen, se delaminen o se quemen [Hocheng, 2012]. Tanto las propiedades como la orientación de la fibra y la matriz tienen una incidencia muy grande en el proceso de corte que se realice sobre un determinado componente.

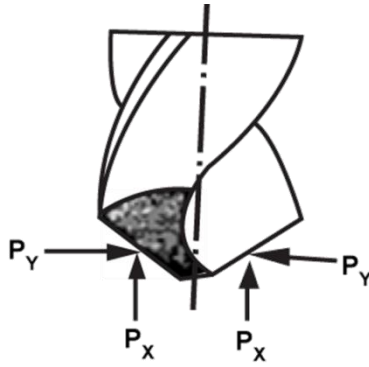
En todo proceso de mecanizado se busca lograr una buena terminación. En los materiales compuestos se deben evitar fallas típicas como ruptura de fibra, despegado matriz-fibra, concentración de tensiones, formación de micro grietas y deformaciones alrededor de la zona de agujereado, ya que podría desembocar en el rechazo de un gran número de piezas [Alberdi, 2015].

El mecanizado es una etapa clave dentro de todo el proceso de fabricación. Si es de mala calidad puede tener impacto en las prestaciones de los componentes. El agujereado es uno de los procesos de mecanizado más usuales en los materiales compuestos debido a la necesidad de vinculación con otros componentes. El agujereado defectuoso constituye un 60% de todos los rechazos que se producen en la industria [Liu, 2012].

### 2.1. Agujereado de materiales compuestos

#### 2.1.1. Conceptos generales

Se define **fuerza de avance** de una herramienta como una fuerza axial, en la dirección de avance de la herramienta. Esta fuerza comprime el taladro a lo largo de su eje. La **fuerza de corte** es perpendicular a la fuerza de avance y está contenida en la sección del taladro. Usualmente se la mide indirectamente a partir de la determinación del torque. En la Figura 6 se observa la fuerza de avance representada por  $P_x$ , el torque representado por  $P_y$ . y la sumatoria vectorial de ambas fuerzas, la fuerza de corte.

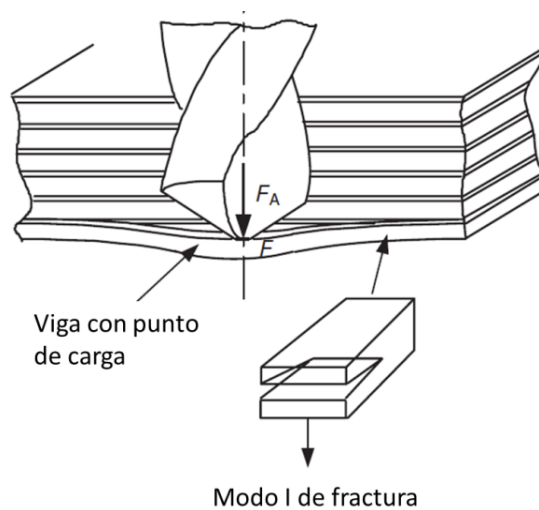


**Figura 6.** Fuerzas que inciden durante la perforación.

En el caso de los laminados de polímeros reforzados con fibra (FRP), se produce un fenómeno llamado **delaminación** debido a al proceso de agujereado y ocurre tanto en el plano de entrada del material como en el de salida. Según Koenig (1985) existe una fuerza de avance crítica debajo de la cual el material no se daña. La fuerza de avance depende de la pieza a mecanizar, su material y geometría, así como los otros parámetros del mecanizado. Se puede definir la fuerza de avance  $F_A$  como [Hocheng, 1990]:

$$F_A = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu)}} \quad (1)$$

donde  $E$  corresponde al módulo de Young,  $h$  al espesor de delaminado (de la última capa),  $\nu$  es la relación de Poisson,  $G_{IC}$  es la energía crítica de propagación de grietas por unidad de área en el modo  $I$  (Figura 7).



**Figura 7.** Esquema de perforación en materiales compuestos.

Evitar la delaminación resulta fundamental, ya que este tipo de defectos produce un empeoramiento radical en las propiedades mecánicas, y se considera la falla más grave en este tipo de materiales [Davim, 2003] [Bayraktar, 2012]. Para evitarla en el agujereado, la fuerza de avance aplicada debe estar por debajo de este valor crítico que es función de las propiedades del material y del espesor del laminado sin agujerear. Con una fuerza de avance por debajo del valor crítico y utilizando una velocidad de corte alta se evitará o minimizará el daño por delaminación.

## **2.2. Aproximaciones para el análisis del mecanizado y la formación de viruta**

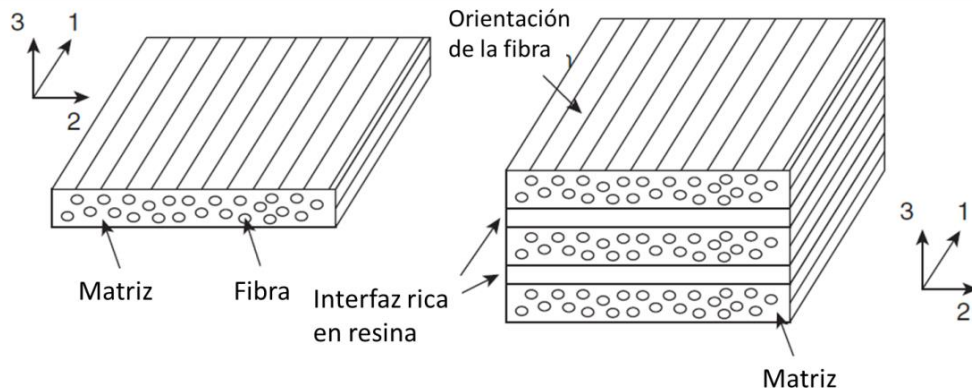
En el mecanizado de materiales compuestos, su inhomogeneidad, anisotropía y su estructura laminar puede dar origen a un daño extenso sobre el componente, imprecisiones e incumplimiento de las tolerancias dimensionales si no se eligen las herramientas y las estrategias adecuadas a tal punto que pueden llevar al rechazo de la pieza. Por eso es necesario conocer la física involucrada en el proceso de mecanizado de la herramienta y este tipo de materiales, así como la formación de viruta.

El mecanismo más simple de estudio para entender la física de la remoción de material es el corte ortogonal. El análisis de los modos de falla de laminados unidireccionales resulta más interesante que el de los multidireccionales, ya que en este último se suprimen algunos modos de falla, impidiendo estudiar todos los casos cuando se utiliza este tipo de corte.

En la Figura 8 se presenta una lámina de compuesto. En este material la fibra es muy pequeña en casi todos los casos (entre 5-10  $\mu\text{m}$ ) como para controlar su posición dentro de la matriz durante la fabricación. Es por esto que el plano 2-3 se considera aleatorio ya que la lámina se comportará transversalmente como un material isotrópico, implicando que las mismas fuerzas de corte serán ejercidas para todos los planos de corte en la dirección 1.

El espesor estudiado para una lámina es en general demasiado fino para una aplicación real de ingeniería. Es necesario, entonces construir un multilaminado unidireccional de un espesor mayor. Esto conlleva a una serie de diferencias de las propiedades mecánicas, respecto al caso anterior, en las direcciones 2 y 3 debido a las capas intermedias ricas en resina, las cuales transforman el material en ortotrópico, ya que pierde su isotropía transversal. Estas capas ricas en resina son los sitios preferenciales

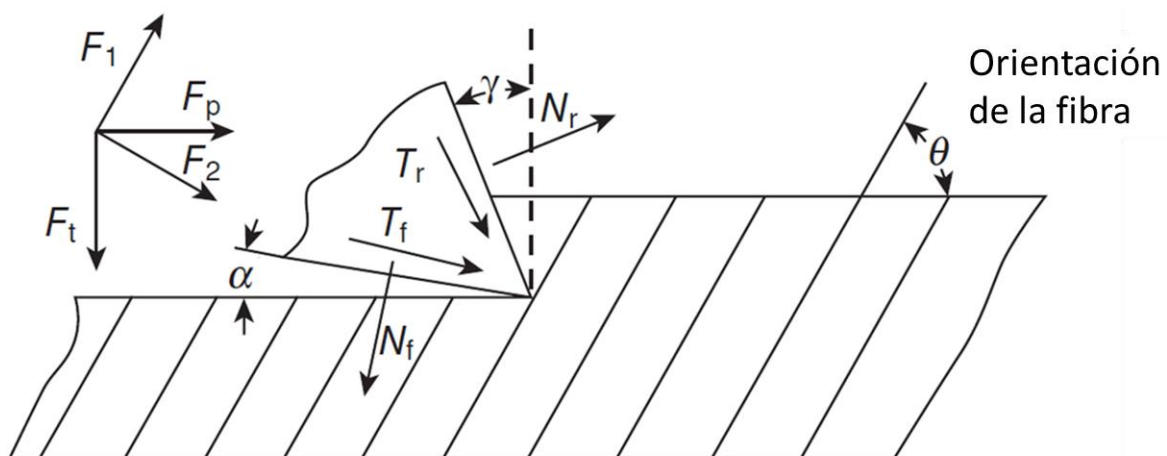
donde ocurre el delaminado, por lo que es fundamental tenerlo en cuenta a la hora de mecanizar el material [Jones, 1999].



**Figura 8.** (Izquierda) Laminado unidireccional. (Derecha) Multilaminado unidireccional [Hocheng, 2012].

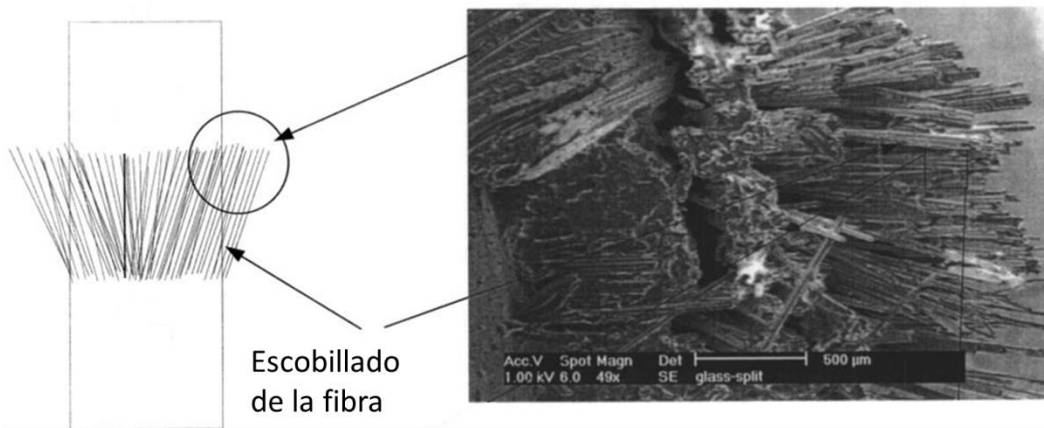
### 2.3. Formación de viruta

Los materiales compuestos son frágiles, por lo que su mecanizado usualmente produce viruta discontinua y el grosor casi siempre coincide con la profundidad de corte establecida como muestra la Figura 9. La formación de la viruta estará dada por la orientación de la fibra con respecto al borde de ataque de la herramienta (representado como  $\theta$  en la Figura), siendo afectados a su vez por otros parámetros, como el tipo de matriz y fibra, el ángulo de ataque  $\gamma$  de la herramienta, la profundidad y la velocidad de corte.

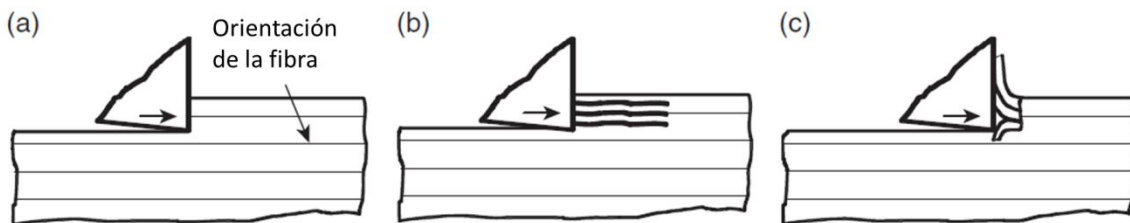


**Figura 9.** Esquema de fuerzas en el corte ortogonal de un compuesto unidireccional [Hocheng, 2012].

El caso en el que el ángulo de la orientación de la fibra  $\theta$  es cero es particular ya que la formación de viruta se ve afectada por el ángulo de ataque de la herramienta  $\gamma$ . Cuando  $\gamma = 0^\circ$  se genera una compresión en la superficie de contacto entre la herramienta y el material, generando **fallas de barrido** (ver Figura 10), donde se generan múltiples divisiones del material, espaciados al azar dentro del espesor de la viruta y el ancho de la pieza mecanizada, propagándose paralelas a la dirección de la fibra como muestra la Figura 11. La viruta formada se dobla por la herramienta de avance y se deslizan a lo largo de su cara, hasta que se fracturan. Mediante este proceso la forma de la viruta será irregular [Arola, 1996] [Lopresto, 2001].

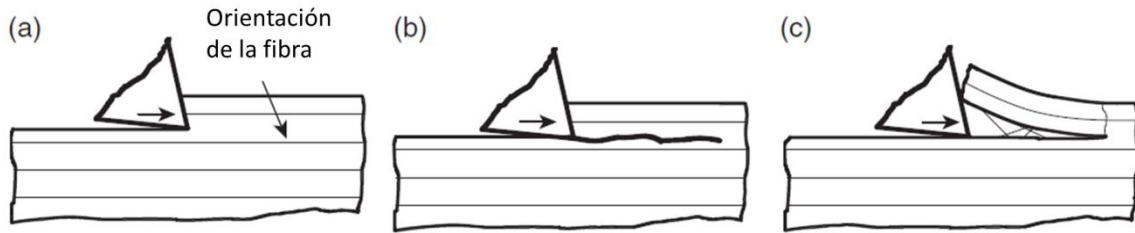


**Figura 10.** (Derecha) Esquema de la falla de barrido; (Izquierda) SEM de la falla de barrido de un material compuesto.



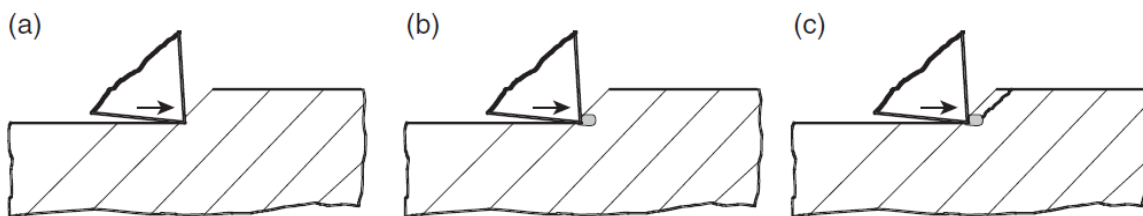
**Figura 11.** Formación de viruta  $\theta = 0^\circ$  y  $\gamma = 0^\circ$  [Hocheng, 2012].

En el caso de los ángulos de ataque de la herramienta sea mayor a cero, se forma una componente de carga de Modo I que favorece la división a lo largo del plano de corte, por lo que bajo una fuerza de corte determinada, se origina una propagación de la falla de hendidura a cierta distancia del filo de corte como muestra la Figura 12. La viruta toma la forma de una viga en voladizo y comienza a deslizarse a lo largo de la herramienta, que se rompe en flexión. Este proceso se repite en forma continua.



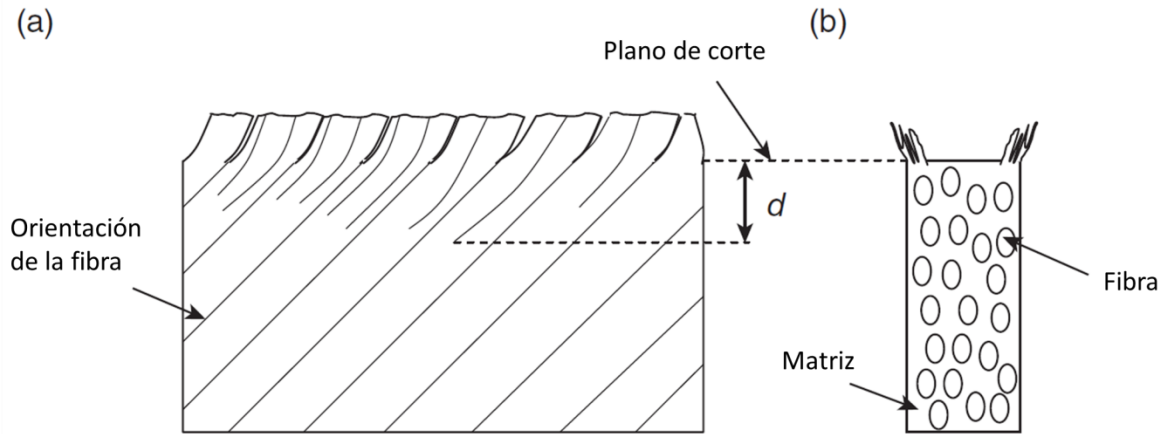
**Figura 12.** Formación de viruta para  $\theta = 0^\circ$  y  $\gamma > 0^\circ$  [Hocheng, 2012].

Cuando la orientación de la fibra está entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , la formación de viruta es independiente del tipo de fibra y matriz, y de los parámetros de mecanizado. Como se ve en la Figura 13a, el filo de la herramienta ataca material nuevo, generando un estado de compresión local. A partir de esto se desarrolla una zona donde hay fibras y microfisuras en la matriz, generando un cizallamiento producido por compresión como muestra la Figura 13c, el cual rápidamente se propaga a lo largo de la dirección de la fibra, dando origen a una viruta en forma de bloque, que puede tener un tamaño de unos pocos micrones a 1 mm de largo.



**Figura 13.** Formación de viruta en el caso que la orientación de la fibra sea  $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ ; (a) contacto de la herramienta con el material; (b) formación de zona de compresión local; (c) cizallamiento inducido por compresión [Hocheng, 2012].

Si se incrementa mucho el ángulo de ataque de la herramienta, ocurre un nuevo fenómeno relacionado con el material que se encuentra debajo del plano de corte, generando fisuras que se extienden algunos milímetros en la pieza y se forman en la misma dirección que la fibra como se muestra en la Figura 14a. A su vez, se puede observar en la Figura 14b cómo hay dos capas fuera del plano en los extremos que no son cortadas por la herramienta [Lopresto, 1999]. El corte será impreciso y la pieza tendrá un daño en el interior que puede ser inaceptable.

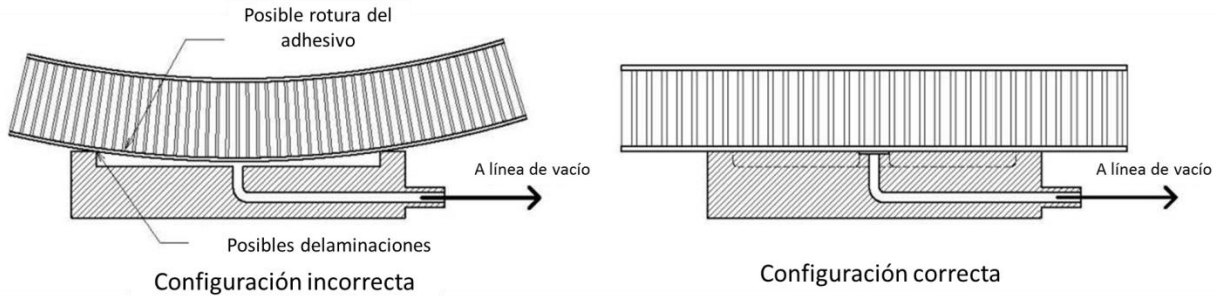


**Figura 14.** Roturas que se pueden observar en un laminado unidireccional a lo largo de la fibra cuando el ángulo de ataque de la herramienta se aproxima a  $90^\circ$ ; (a) vista lateral; (b) vista en corte [Hocheng, 2012].

## 2.4. Estrategia de mecanizado para estructuras sándwich

Las operaciones más comunes sobre paneles de material compuesto son fresado, serruchado y agujereado, donde la pieza se soporta rígidamente a la máquina y la herramienta se desliza sobre el volumen a remover. Las fresas con recubrimiento y las mechas con recubrimiento PVD son las que se encuentran mayormente en el mecanizado de paneles sándwich. Las variables de corte dependen exclusivamente de las fibras que se están cortando. La matriz del compuesto es completamente independiente de las variables de corte [Bauer, 2016].

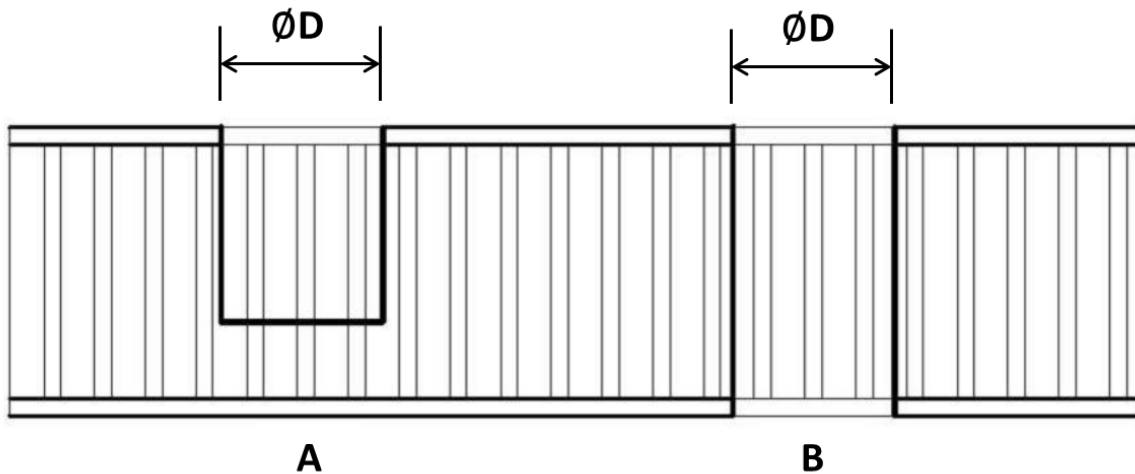
Para lograr un mecanizado preciso, se debe realizar el anclaje de los paneles. Dado que estos materiales no son ferromagnéticos, los sistemas de anclaje de son mecánicos o fluido-mecánicos. El más utilizado es este último, mediante sistemas de ventosas conectadas a una línea de vacío, distribuidos uniformemente sobre la superficie del panel. Es importante destacar que en estos sistemas de anclaje solo las ranuras conectadas a la línea de vacío deben estar fuera del plano de apoyo, ya que en el caso contrario se puede producir la deformación del panel (Figura 15). Otra precaución que se debe tener en cuenta es la de no colocar la ventosa sobre la zona en la que se vaya a mecanizar un agujero pasante ya que esto podría producir la pérdida de sujeción de la pieza.



**Figura 15.** (Izquierda) Configuración correcta y (Derecha) configuración incorrecta de ventosas de vacío [Bauer, 2016].

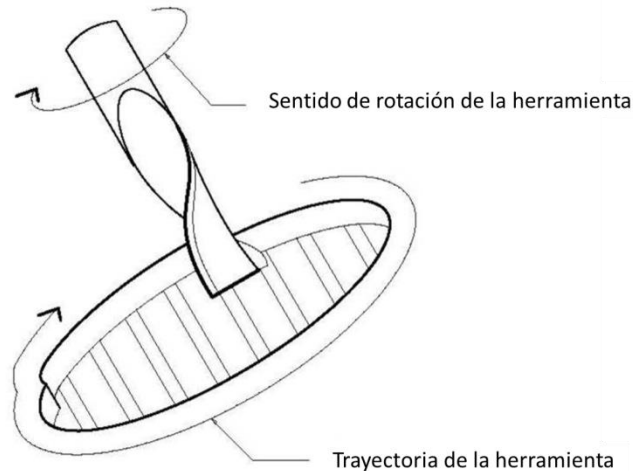
### 2.4.1. Procedimiento de mecanizado

Los mecanizados de agujeros en este tipo de materiales en general se efectúan para la colocación de insertos. Usualmente hay dos tipos: pasante y no pasante, como se observa en la Figura 16.



**Figura 16.** Alternativas de agujereado en estructura sándwich, A: Agujero no pasante; B: agujero pasante [Bauer, 2016].

Los diámetros de los agujeros varían entre 9 y 100 mm, y para cualquier tamaño, el método de mecanizado es el mismo. Para que la pieza resultante tenga buena terminación, la herramienta debe evitar que el filo de la herramienta ataque al laminado perpendicular al plano. Esto es inevitable pero la estrategia es utilizar herramientas de un diámetro menor al agujero que se desea realizar y luego posicionar la fresa para generar una trayectoria de contorneados concéntricos (Figura 17).



**Figura 17.** Esquema de mecanizado recomendable para el mecanizado de estructuras sándwich [Bauer, 2016].

Para insertos pasantes en paneles de espesores menores a 15 mm la operación de agujereado se puede realizar mecanizando ambas caras en una sola pasada. Si superan este diámetro, es recomendable realizar el mecanizado en cada cara del panel de manera independiente.

Para agujeros no pasantes, el corte se puede efectuar en toda la profundidad de corte sin tener en cuenta el panel de abejas debido a que su rigidez es muy baja en comparación al CFRP.

## 2.5. Desgaste de la herramienta

En cualquier proceso de mecanizado las superficies de las herramientas entran en contacto con la pieza a mecanizar y su viruta, generalmente en condiciones de alta presión y temperatura. Si la herramienta se daña o desgasta de manera abrupta, puede deberse a la selección incorrecta de la herramienta para ese material o a una mala selección de la velocidad de avance o las RPM. En condiciones normales una herramienta se desgasta progresivamente hasta que llega a una etapa en la que ya no cumple la función de remover material dejando una buena terminación superficial. El desgaste de las herramientas lleva a un incremento en las fuerzas de corte y en el consumo de potencia, una mayor temperatura en el proceso de mecanizado y un corte impreciso.

### 2.5.1. Tipos de desgaste

El desgaste de las herramientas es un fenómeno de gran complejidad de origen diverso e interactuando muchas veces simultáneamente [Shaw, 2005]. Entre ellos se pueden nombrar los siguientes

- **Desgaste abrasivo:** Asociado a la presencia de partículas duras en la pieza, lo cual genera micro cortes en la herramienta, generando pequeñas ranuras en la superficie de la herramienta.
- **Desgaste difusivo:** Esto se debe a la migración de átomos de la pieza a la herramienta y viceversa, favorecido por altas temperaturas y presiones.
- **Desgaste erosivo:** Se produce el desbaste de la herramienta debido a la interacción con partículas abrasivas sueltas en un medio.
- **Desgaste corrosivo** Es el ataque químico sobre la superficie de la herramienta favorecido por las altas temperaturas generadas durante el proceso de corte

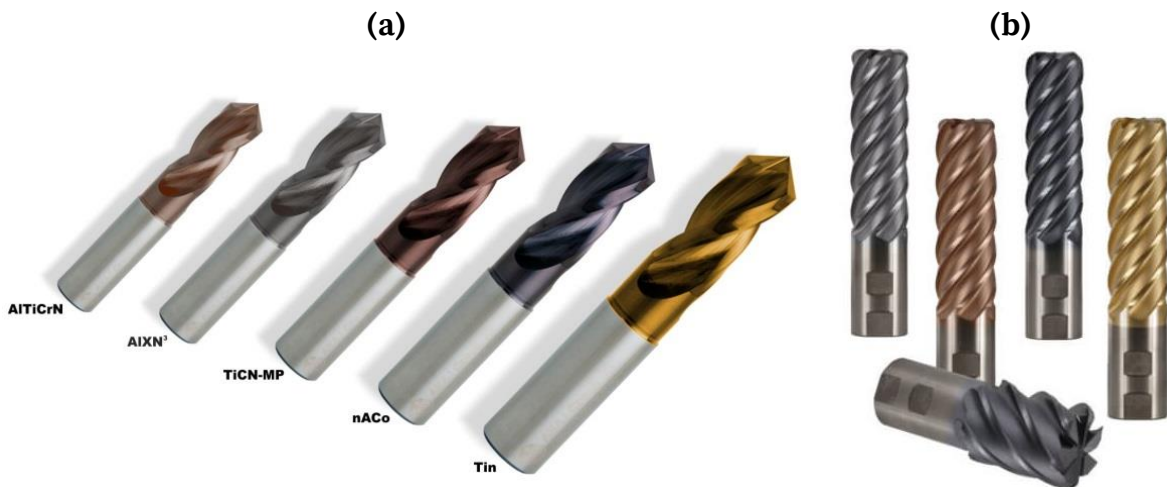
### 2.5.2. Desgaste de la herramienta en los materiales compuestos

A diferencia de los MMC, los PMC no son ni tan resistentes ni tan dúctiles como los metales. Los PMC son más frágiles y por lo tanto usualmente generan una viruta discontinua y corta, disminuyendo el desgaste en la superficie de ataque de la herramienta, pero generando una gran fricción en la superficie de despeje [Çelik, 2015]. Además, los fragmentos sueltos de la fibra atrapada entre la superficie mecanizada y la superficie de despeje generan una condición de abrasión de 3 cuerpos. El desgaste de las herramientas en el proceso de mecanizado de PMC está controlado mayormente por procesos mecánicos en lugar de químicos, por lo tanto afecta directamente el tipo de refuerzo que se use, la disposición y el porcentaje de refuerzo y matriz. Los mecanismos de desgaste más usuales son el astillado, la abrasión, erosión y la microfractura. Salvo el astillado, el resto son graduales y generan un desgaste progresivo.

### 2.5.3. Herramientas recubiertas de carburo y su desgaste

Las herramientas recubiertas de carburo se recubren con varios micrómetros de espesor, de cerámicos duros, depositados sobre carburos cementados para mejorar su resistencia al desgaste. Este tipo de recubrimientos se pueden realizar por deposición química de vapor (CVD) a altas temperaturas (entre 900 C y 1050 C) o mediante la

deposición física de vapor (PVD) a temperaturas menores (entre 400 y 450 C). Estos últimos proveen una microestructura más fina, mayor dureza y menor deterioro del carburo a altas temperaturas. Se utilizan capas simples o múltiples de TiC, TiN, TiCN y  $Al_2O_3$ . Este tipo de cerámicos son más estables a la temperatura que el carburo de tungsteno. Los recubrimientos PVD también son más adecuados para recubrir herramientas de corte afiladas, como fresas de metal duro y brocas para mecanizar materiales compuestos. En la Figura 18 se muestran fotografías de herramientas recubiertas con PVD de agujereado y fresado.



**Figura 18.** Fotografía de herramientas con recubrimientos con PVD. (a) Taladro; (b) Fresas.

El mecanismo dominante en el desgaste de este tipo de herramientas al mecanizar materiales compuestos utilizando velocidades de avance bajas es la abrasión. Usualmente tiene huecos en la superficie de desgaste que indican los lugares donde se desprendieron los granos de recubrimiento. Ranuras abrasivas poco profundas se forman en la cara del flanco y siguen en la dirección del corte.

Cuando la velocidad de avance aumenta o el material de la pieza es menos homogéneo, las fuerzas oscilantes en el filo dan lugar a un microastillado y microfracturas como mecanismo dominante, pudiendo causar un daño severo en la herramienta. El redondeo también se puede visualizar en la superficie de ataque de la herramienta, pero este efecto es mucho menor que el que se produce en la superficie de despeje [Ramulu, 1989][Philbin, 2005].

# Capítulo 3: Introducción a las ondas elásticas y a la Emisión Acústica

## 3.1. Propagación de ondas elásticas

Las ondas elásticas pueden propagarse de maneras volumétricas y superficiales. Las ondas volumétricas son excitaciones progresivas de los elementos de volumen en un sólido que involucran dilataciones elásticas y distorsiones. A diferencia de las ondas volumétricas, las ondas superficiales se pueden considerar como ondas planas donde la energía de deformación viaja a través de la superficie del material. En este tipo de propagación se incluyen las ondas tipo Rayleigh y Love. Hay otro tipo de ondas que se propagan en un sólido tipo placa que son las ondas guiadas, por ejemplo, las de Lamb. Esto ocurre cuando el espesor de la placa es del orden de la longitud de onda de la propagación.

## 3.2. Ondas en volumen

### 3.2.1. Ondas P y S

En general, en la literatura se describe típicamente para este caso la propagación en un medio infinito isótropo, homogéneo y elástico, y se llega a una ecuación de ondas con dos soluciones, las **ondas compresivas** (también conocidas como longitudinales o P) y las **ondas transversales** (también denominadas de corte o S), ambas representadas en las Figuras 19 y 20, respectivamente.

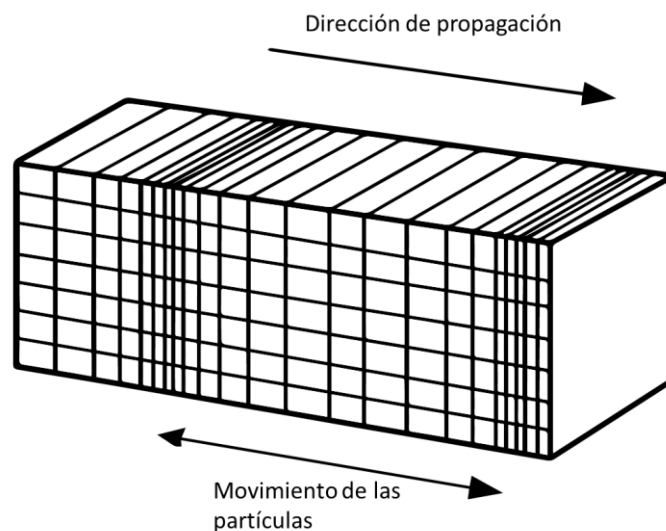
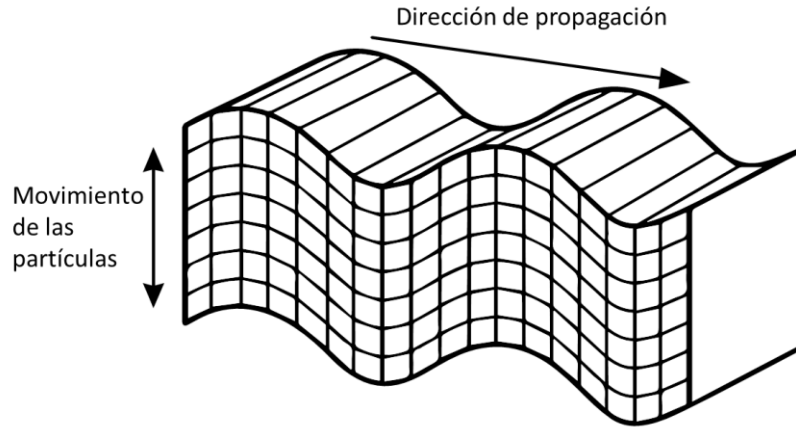


Figura 19. Ondas longitudinales.



**Figura 20.** Ondas transversales.

Las ondas longitudinales son escalares mientras que las ondas transversales son vectoriales y están polarizadas en un plano perpendicular a la dirección de propagación, que puede descomponerse en dos componentes ortogonales, una denominada vertical o **SV** y otra horizontal o **SH**.

Las ondas P y S no solo se propagan de diferente manera, sino a diferentes velocidades siguiendo las ecuaciones 2 y 3 (para el caso de medio infinito, lineal isótropo homogéneo):

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

donde  $\lambda$  y  $\mu$  son las constantes de Lamé y surgen a partir del desarrollo de la ecuación de ondas.

### 3.3. Ondas en superficie

#### 3.3.1. Ondas de Rayleigh

El movimiento de partícula en las **ondas de Rayleigh** (también conocidas como ondas R) es elíptico, su giro va en contra de la dirección de propagación y están polarizadas verticalmente. Se propagan en la superficie de un medio sólido y son las que predominan en los sismos. Este tipo de ondas es de poca penetración, del orden de una longitud de onda, como se puede observar en la Figura 21. Al propagarse por la

superficie, la pérdida por distancia de estas ondas es de la raíz cuadrada de la distancia que recorren. Su velocidad está representada por:

$$c_R = \alpha c_s \quad (4)$$

donde:

$$\alpha = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (5)$$

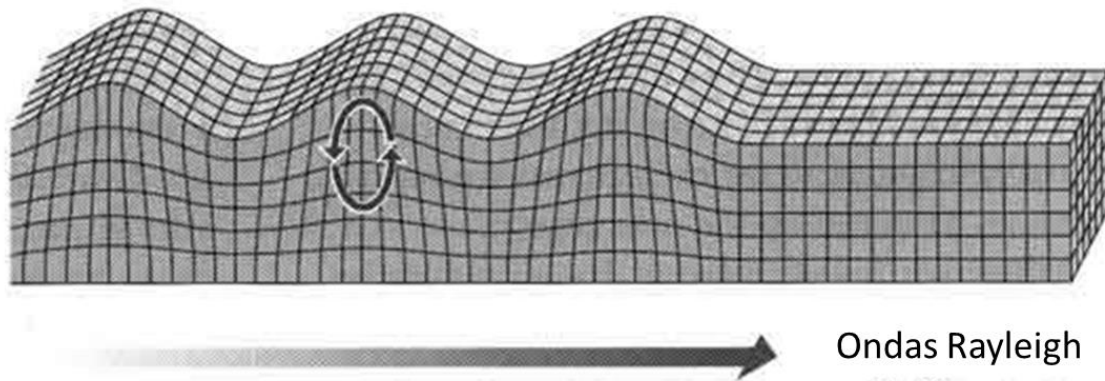


Figura 21. Ondas de Rayleigh.

### 3.3.2. Ondas de Love

Las **ondas de Love** son ondas polarizadas horizontalmente y transversales a la propagación (SH) y viajan más lento que las P y las S, pero más rápido que las ondas de Rayleigh. En la Figura 22 se exhibe un diagrama de las mismas donde se ve que el movimiento de las partículas es en el plano horizontal de propagación. Este tipo de ondas también están presentes en la actividad sísmica. Decaen con la raíz cuadrada de la distancia, por lo que su atenuación es significativamente menor que las volumétricas.

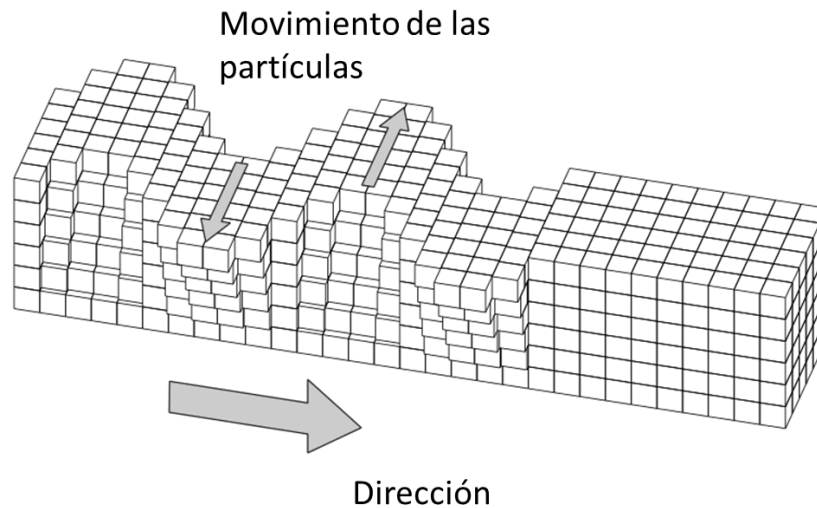


Figura 22. Ondas de Love.

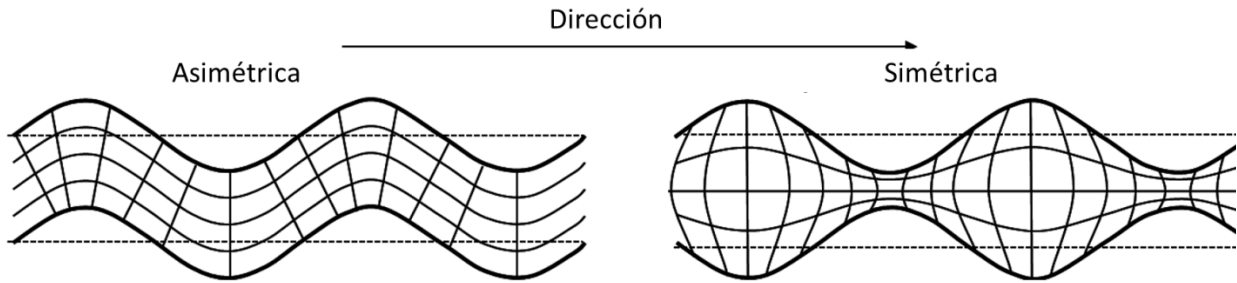
### 3.4. Ondas guiadas

#### 3.4.1. Ondas de Lamb

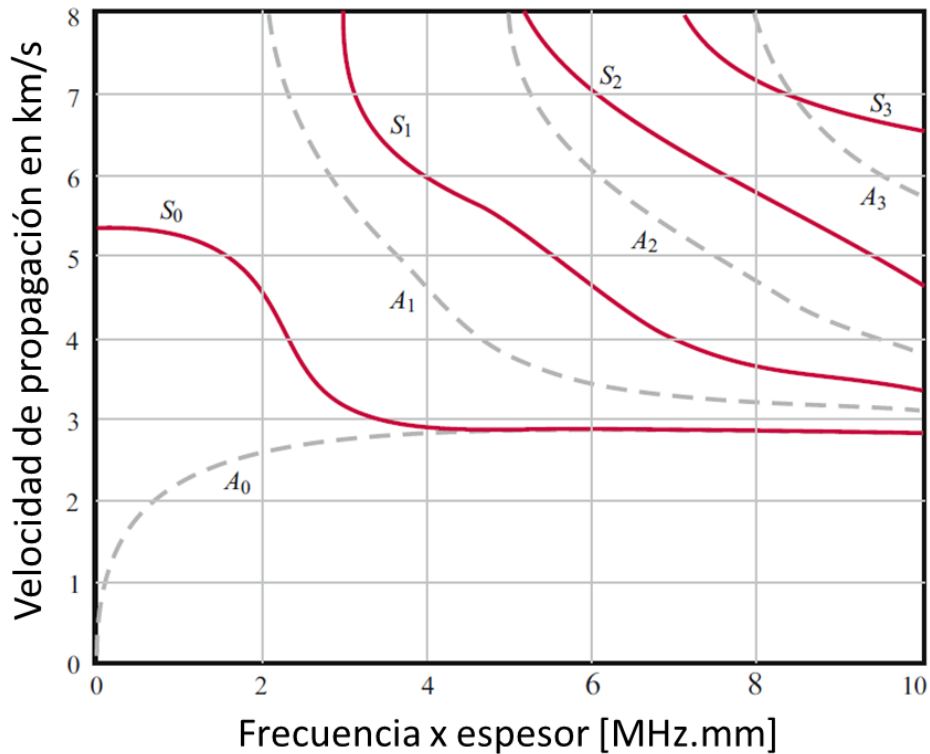
En las estructuras tipo placa, la interacción entre las P y S con una condición de contornos libres, causan reflexiones e interferencias generando un tipo particular de ondas llamadas **ondas de Lamb** [Lammering, 2018]. Estas ondas solo se propagan en sólidos de espesores menores o similares a la longitud de onda. La propagación de estas ondas se extiende a tubos y a cilindros sólidos.

A partir de las soluciones de las ecuaciones de onda se extraen numerosos órdenes de dos tipos de ondas Lamb, las **extensionales** (o simétricas, usualmente denominadas con la letra  $S_n$ ) y las **flexurales** (o antisimétricas, denominadas con la letra  $A_n$ ) representadas en la Figura 23 y adonde el índice n corresponde al orden. El carácter dispersivo de estas ondas es una de sus características principales. Esto significa que la velocidad de fase de las ondas difiere en función de la frecuencia como se muestra en la Figura 24 para distintos órdenes de ondas  $A_n$  y  $S_n$ . La velocidad de grupo también depende de la frecuencia.

Una de las características principales de las ondas Lamb es su baja atenuación por distancia en comparación a las ondas longitudinales, haciéndolas apropiadas para la utilización de técnicas de inspección a grandes distancias. Los defectos que se presentan en materiales compuestos como las placas de CFRP constituyen fuentes de EA que propagan ondas Lamb, pudiendo asociarse sus características con defectos específicos como delaminación, rotura de matriz o falla en la interfaz [Mizutani, 2000] [Sause, 2010].



**Figura 23.** Ondas de Lamb flexurales o antisimétrica (izquierda) y extensionales o simétrica (derecha).



**Figura 24.** Curvas de dispersión para una placa de aluminio.

### 3.5. Atenuación de las ondas elásticas

Anteriormente se mencionó la atenuación de propagación de los distintos tipos de ondas en función de la distancia. Este tipo de atenuación se conoce como **atenuación geométrica** y se produce cuando el frente de onda se propaga, alejándose de la fuente, disminuyendo la intensidad ya que su potencia se distribuye a lo largo de una superficie cada vez mayor. Esta atenuación depende de la fuente emisora.

Por otra parte, cuando las ondas elásticas interactúan con el medio en el que se propagan intercambiando energía, este tipo de atenuación se conoce como **atenuación por absorción y amortiguamiento o pérdidas genuinas**, y usualmente se asocia a efectos magnetoelásticos, termoelásticos, etc. [Gómez, 2015]. Este tipo de absorción varía según el tipo de material y la frecuencia, pero siempre decrece exponencialmente con la distancia.

Si se suponen ondas armónicas planas, se puede describir la magnitud de algún parámetro como la tensión, presión o desplazamiento como:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \text{sen}(\beta x - \omega t) \quad (6)$$

donde  $A_0$  es la magnitud en el origen,  $\alpha$  representa los principales mecanismos atenuadores,  $\beta = 2\pi f/c$  donde  $c$  es la velocidad de fase y  $f$  la frecuencia.

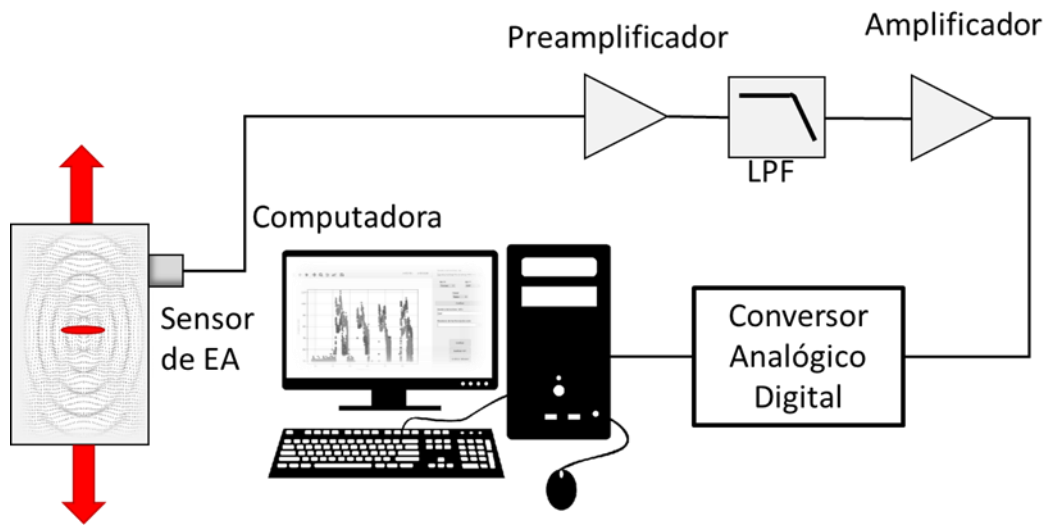
### 3.6. Emisión Acústica

El método de Ensayos No Destructivos (END) de Emisión Acústica (EA) permite detectar distintos tipos de sollicitaciones (mecánicas, eléctricas, químicas, etc.) a partir de la propagación de las ondas elásticas (es decir, movimiento), utilizando sensores que convierten la energía mecánica en eléctrica en el rango de 20 kHz a 1 MHz [Gómez, 2015]. Este método es denominado “pasivo” ya que no se efectúa una excitación con ondas de la misma clase para estudiar la interacción del material [Grosse, 2008], como en otros métodos de END (Ultrasonido, Rayos X, etc.), sino que las ondas provienen del mismo material.

#### 3.6.1. Partes constitutivas de un equipo de EA

En la Figura 25 se puede observar un esquema básico de las etapas constitutivas en la cadena de medición de EA, constituido por: un sensor, un preamplificador, una etapa de acondicionamiento eléctrico, el módulo de conversión analógico-digital y un medio de almacenamiento y procesamiento de los datos.

Los sensores utilizados usualmente son piezoeléctricos (Figura 26), debido a su sensibilidad de desplazamiento y rango de frecuencias ( $10^{-13}$  m y 0,1-2 MHz, respectivamente) frente a otro tipo de sensores como los capacitivos o interferométricos. Estos sensores usualmente son de tipo cerámico, tipo Zirconato Titanato de Plomo (PZT).



**Figura 25.** Esquema de un equipo de medición de EA.



**Figura 26.** Sensores piezoeléctricos de EA.

Debido a la baja amplitud de la señal eléctrica obtenida en el sensor, del orden de los  $\mu\text{V}$ , producida por el arribo de las ondas elásticas, se debe utilizar un preamplificador que permita acondicionar de manera lineal en el rango de frecuencia de la EA. La extensión del cable desde el sensor hasta el preamplificador debe ser pequeña, caso contrario, la señal sufrirá una atenuación que producirá una baja relación señal-ruido (SNR, por sus siglas en inglés). Estos preamplificadores suelen tener filtros físicos que permiten eliminar las frecuencias espurias de la señal (ruido).

Luego la señal acondicionada pasa al equipo de EA encargado de cumplir diversas funciones, como el filtrado en amplitud y nuevamente en frecuencia, la conversión analógico-digital, la parametrización analógica y/o digital, la adquisición de la señal y el tratamiento de los parámetros mediante algoritmos. El equipo, por el mismo cable coaxil que toma la señal del preamplificador, entrega la tensión de alimentación a este. Debido a la alta frecuencia de muestreo de los equipos de EA (que puede llegar hasta 40 MHz) y su alta resolución (hasta 18 bits), el manejo de los datos puede volverse muy difícil. Es por esto que las señales se graban y parametrizan dentro del equipo una vez que la señal cruza un determinado umbral de detección fijado por el usuario. Se dice que ocurre un “hit” de EA cuando la señal supera este umbral. En ese momento comienza la parametrización de la señal de EA hasta que deje de cruzar el umbral, el tiempo transcurrido se denomina duración del hit y allí éste finaliza, y el equipo se dispone a “escuchar” el siguiente. Los distintos parámetros que se pueden obtener de un hit de EA se detallarán en el siguiente apartado.

Una vez ocurrido el hit, el equipo de EA puede tomar la porción de señal digitalizada durante ese tiempo (o durante un tiempo menor según el tamaño del buffer) y enviarla a memoria, generando un archivo “ASCII” denominado “Forma de onda” o Waveform en inglés, que contiene información de ese hit. Entonces por cada hit de EA, se podrán obtener sus parámetros y su forma de onda (FO). Estas maneras de adquirir las señales son las más utilizadas para el procesamiento de los datos, permitiendo ambas en la mayoría de los casos realizar análisis en tiempo real. Principalmente los parámetros característicos que no necesitan capacidad de cálculo.

Por último, se encuentra otra forma de adquisición menos frecuente denominada continua o ‘*Streaming*’ en inglés, con la cual se adquiere la señal por completo durante todo el ensayo, independientemente del umbral de disparo prefijado. Esta manera de adquirir los datos resulta un tanto impráctica ya que se requiere una gran cantidad de almacenamiento. Estas señales resultan muy difíciles de procesar ya que se requiere una gran cantidad de recursos de la computadora a utilizar.

### 3.6.2. Parámetros de EA

A partir de un hit de EA se extraen distintos parámetros representativos (Figura 27) [IRAM NM-302, 2012].

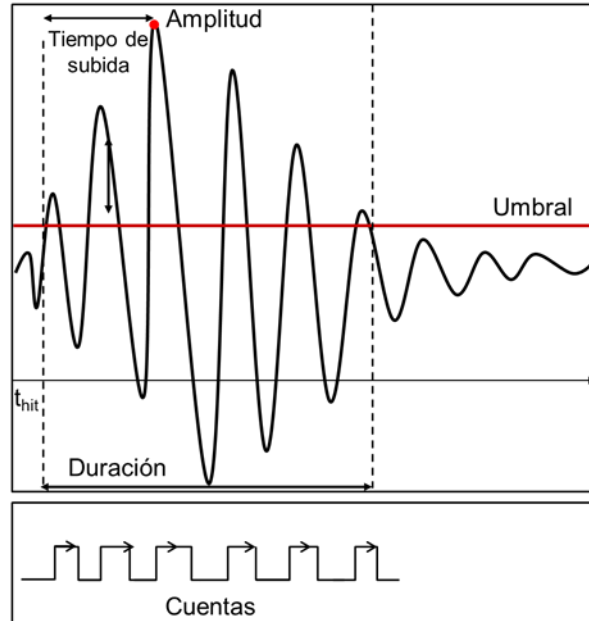


Figura 27. Parámetros de un hit de EA.

A continuación, se detallan parámetros típicos obtenidos de la señal de EA [PAC, 2007].

- **Tiempo del hit:** Es el tiempo durante el cual un hit supera el umbral de detección y es registrado por el equipo.
- **Amplitud:** es el pico máximo de amplitud (positivo o negativo) del hit de EA. Usualmente se expresa en dB según la relación

$$dB = 20 \log \left( \frac{V_{m\acute{a}x}}{1\mu V} \right) \quad (7)$$

donde  $V_{m\acute{a}x}$  es la tensión (en Volts) máxima del hit de EA medida a la salida del sensor.

- **Cuentas:** este parámetro cuenta la cantidad de ciclos que el hit de EA cruzó el umbral. En el caso de la Figura 3, las cuentas son 6.
- **Duración:** se define como el tiempo que transcurre desde la primera hasta la última vez que la señal cruza el umbral durante el hit.

**RMS:** es el valor cuadrático medio, que representa el promedio de la señal V rectificada a lo largo de un tiempo T, su valor es en Volts.

$$RMS = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t)]^2 dt\right)} \quad (8)$$

- **ASL (Average Signal Level):** Es una medida de la amplitud de la señal promediada. Este parámetro es similar al RMS. Su diferencia principal es que el ASL se mide en dB.
- **Tiempo de subida:** Es el tiempo que tarda el hit de EA desde que cruza el umbral hasta que llega a la Amplitud máxima.
- **Cuentas hasta el pico:** como su nombre lo dice, cuenta la cantidad de veces que la señal cruza el umbral hasta llegar a la Amplitud máxima
- **Frecuencia Promedio:** determina la frecuencia promedio de un hit a partir del cálculo de las cuentas sobre la duración.
- **Frecuencia de reverberación:** es la frecuencia que se obtiene luego del pico de amplitud máxima y se realiza el cálculo como:

$$F_R = \frac{\text{Cuentas} - \text{Cuentas hasta el pico}}{\text{Duración} - \text{Tiempo de subida}} \quad (9)$$

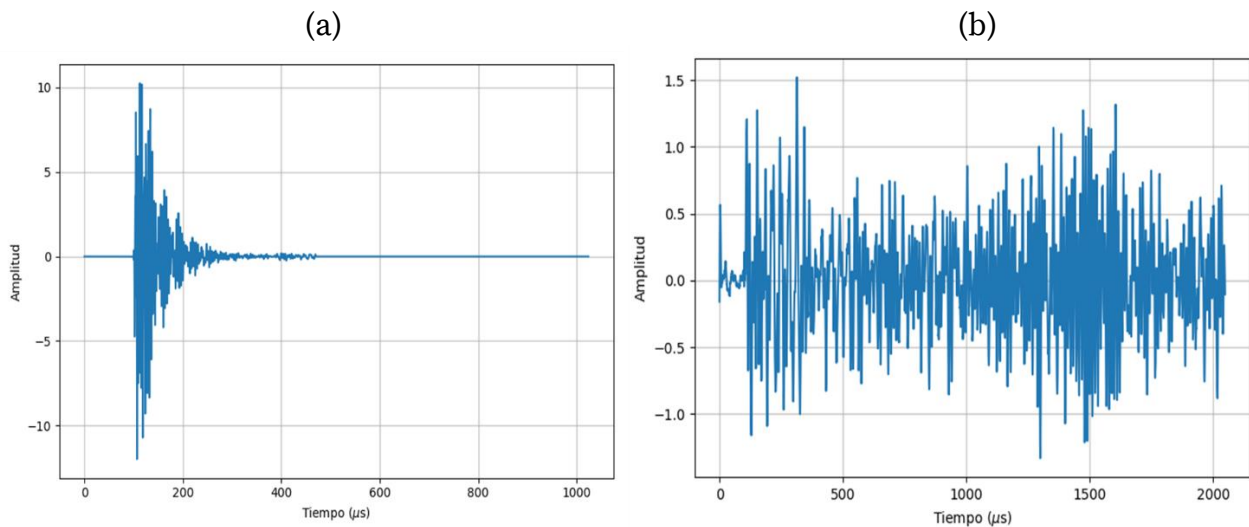
- **Frecuencia de iniciación:** se puede considerar como la frecuencia de la señal considerando solamente desde el inicio hasta el tiempo de subida. Se calcula a partir del cociente de las cuentas hasta el pico y el tiempo de subida.
- **Intensidad de la señal:** se define como la integral de la señal rectificada sobre la duración del hit. Este parámetro es independiente de la ganancia.
- **Energía absoluta:** Este parámetro es una medida de la energía del hit de EA. Se calcula a partir de la integral de la señal al cuadrado durante la duración del hit, dividido por la resistencia de referencia.

### 3.6.3. Tipos de señales

Las señales de EA se pueden dividir en dos grandes familias, las señales continuas y las señales tipo explosión (o *burst* en inglés), representadas en la Figura 28. Las señales tipo *burst* tienen un comienzo y un final, por lo que poseen una duración definida, que depende de la fuente de EA y de las características del medio en el cual se propaga la onda hasta el sitio del detector. Estas señales son pulsos transitorios en forma de paquetes.

Las señales continuas no tienen un comienzo y un final identificables, por lo que se deben utilizar otros parámetros específicos para su estudio. La fricción y la deformación plástica son fuentes típicas de señales continuas.

En los procesos que generan EA, pueden existir conjuntamente fuentes que produzcan ambos tipos de señales superpuestas. El tipo de señal dependerá siempre de la fuente emisora.



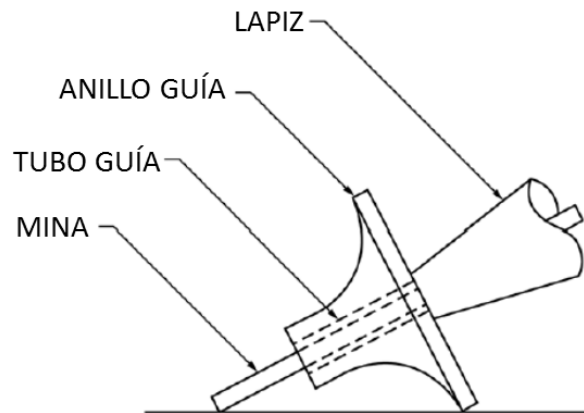
**Figura 28:** Señal tipo explosión (a) y señal tipo Continua (b).

### 3.6.4. Hsu Nielsen

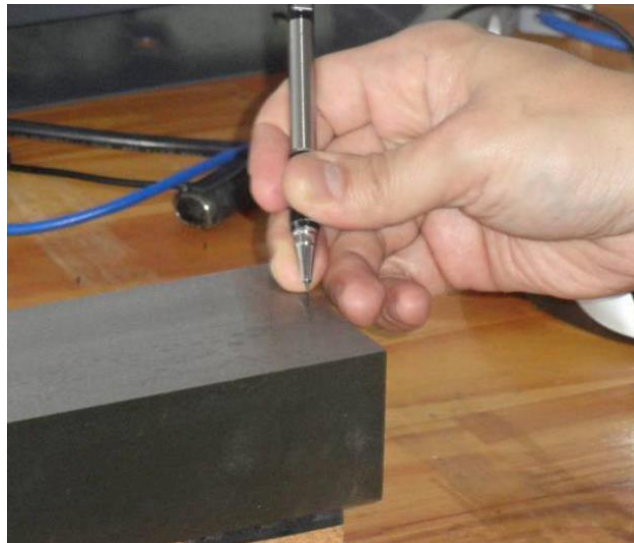
Dentro de las fuentes simuladas de EA se pueden utilizar transductores ultrasónicos, generadores de ruido blanco, barridos o pulsos y también se pueden romper barras de vidrio. Sin embargo, el método más utilizado es el método de rotura de mina de lápiz conocido como Hsu-Nielsen, debido a su practicidad y repetibilidad.

Cuando la mina de lápiz se rompe, se libera la tensión de la superficie donde estaba apoyada, generando una onda acústica [Norma IRAM MERCOSUR 302, 2018]. La misma

debe ser de 0,3 o 0,5 mm de diámetro y de dureza 2H o 3H. Para asegurar la repetibilidad del ensayo se debe poder repetir el ángulo de rotura de la mina por lo que se sugiere utilizar algún dispositivo que lo permita, como la ‘zapata de Nielsen’, exhibido en la Figura 29. En caso de no tener un dispositivo que permita asegurar el ángulo, se puede realizar de manera manual (Figura 30).



**Figura 29.** Aplicación de la Zapata de Nielsen.



**Figura 30.** Rotura de lápiz de manera manual.

Si bien se considera que el método Hsu Nielsen tiene una alta repetibilidad, hay trabajos que han estudiado la influencia de las variables (largo y diámetro de la mina y el ángulo de contacto, si no se utiliza la zapata de Nielsen) en los que se concluye que si bien la forma de onda de la fuente simulada de EA no se ve afectada por el largo de la mina o el ángulo de contacto, sí depende directamente de la magnitud de la fuerza aplicada por el operador [Sause, 2011].

# Capítulo 4: Aprendizaje de máquina y algoritmos de reducción dimensional

## 4.1. Análisis por Componentes Principales

El **Análisis por Componentes Principales** (PCA) es un método matemático que permite describir un conjunto de datos, a partir de la transformación de un conjunto de variables (usualmente correlacionadas) en otro conjunto de variables decorrelacionadas, llamadas **Componentes Principales** (PC). Este método permite la reducción dimensional facilitando el análisis de matrices de datos. Por ejemplo, para la obtención de información gráfica de un conjunto con un alto número de variables, transformando el espacio de cada punto de  $d$  dimensiones en uno de 2 o 3 dimensiones, posibilitando su visualización. Otro ejemplo podría ser la realización de algún tipo de procesamiento de los datos, pero con un reducido número de dimensiones, disminuyendo el costo computacional. A su vez, este método permite obtener información cuantitativa acerca de la injerencia o peso de cada variable [Jolliffe, 2002]. La idea principal en este cálculo radica en que la información más importante está asociada a los valores de varianza grandes.

La dirección de máxima varianza es paralela al autovector correspondiente al mayor autovalor de la matriz varianza-covarianza de los datos. Dada una matriz de datos  $X_{n \times d}$ :

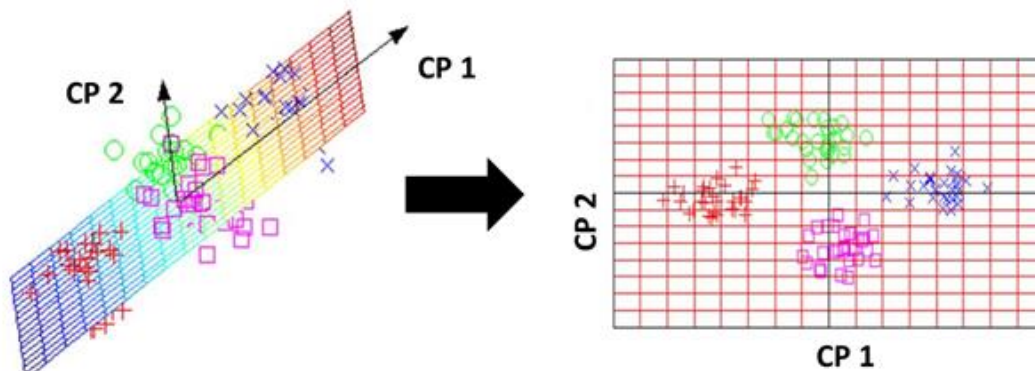
$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^T (X_i - \bar{X}) \quad (10)$$

donde  $X_i$  es el vector de longitud  $n$  correspondiente a la columna  $i$  y  $\bar{X}$  corresponde a la media de esa columna.

La matriz de covarianza es simétrica y de dimensión  $d \times d$ , donde  $d$  es la cantidad de variables que posee la matriz de datos  $X_{n \times d}$ . Su diagonal representa la varianza de cada una de las variables y las otras posiciones representan la covarianza entre las variables en esa posición. La matriz original de datos previamente debe ser normalizada, usualmente se resta la media y se divide por la varianza de cada columna (esta normalización también es conocido por su nombre en inglés *z-scores*). Esto permite que los rangos de cada una de las variables estén acotados.

Luego se debe obtener la matriz de autovalores y autovectores. A partir de estos valores, el autovector con el mayor autovalor será el primer PC de la nueva matriz de datos. De

todas las direcciones ortogonales a la dirección de más alta varianza, la que sigue inmediatamente a la mayor, es la dirección paralela al autovector correspondiente al segundo autovalor más alto y así sucesivamente, extendiéndose a las  $d$  dimensiones originales de la matriz. Se puede realizar un gráfico de los PC, pudiendo obtener en algunos casos agrupamientos debido a comportamientos similares dentro del grupo de datos (Figura 31).



**Figura 31.** Comparación entre los datos originales de una matriz de datos (derecha) y el agrupamiento de distintos valores mediante el PCA.

El PCA es el más simple de los análisis multivariados basados en autovectores y autovalores. Se puede considerar que su funcionamiento revela la estructura interna de los datos a partir de exhibir su varianza. Si estamos realizando un análisis sobre una matriz de una dimensión grande, los PCA proporcionan al usuario una imagen de menor dimensión, una proyección de este conjunto de datos mirándolo desde otra perspectiva, usualmente complementario [Einasto, 2011].

## 4.2. Incrustación Estocástica de Vecinos

Otro método de reducción de variables es la Incrustación Estocástica de Vecinos (SNE, por sus siglas en inglés). A diferencia de los PCA, el SNE permite un mejor análisis de comportamientos no lineales de una matriz de datos, convirtiendo un grupo de datos de alta dimensión (es decir, mayor a 3)  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  en un espacio de baja dimensión (dos o tres dimensiones)  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , permitiendo visualizar el conjunto de datos [Hinton, 2002]. Se denomina al conjunto  $Y$  como mapa, y a sus puntos de baja dimensión  $y_i$  puntos del mapa. El objetivo de este algoritmo es poder mantener la estructura de los datos del espacio multidimensional y sus vecindades en el espacio de baja dimensión.

El algoritmo de la incrustación estocástica de vecinos consiste en calcular las distancias euclidianas por pares entre los puntos de los puntos de alta dimensión, convirtiéndolas

luego en condiciones de probabilidad gaussiana  $p_{ij}$  que representa la similitud entre los puntos  $x_i$  y  $x_j$  [Maaten, 2008]:

$$p_{ij} = \frac{\exp\left(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma_i^2\right)}{\sum_{k \neq i} \exp\left(-\|x_i - x_k\|^2 / 2\sigma_i^2\right)} \quad (11)$$

donde  $\sigma_i$  es la varianza de la distribución gaussiana centrada en el punto  $x_i$ . Este valor debe ser creado para que la *perplejidad* (entendida como la cantidad de vecinos locales) de cada punto esté a un nivel determinado. La condición para que el mapa de puntos  $Y$  represente al conjunto de datos  $X$  es que la condición de probabilidad  $p_{ij}$  y  $q_{ij}$  sean iguales. Se define  $q_{ij}$  como la distribución de probabilidad t (de Student) que representa la similitud entre los puntos  $y_i$  e  $y_j$ :

$$q_{ij} = \frac{\exp\left(-\|y_i - y_j\|^2\right)}{\sum_{k \neq i} \exp\left(-\|y_i - y_k\|^2\right)} \quad (12)$$

Para lograr que las probabilidades sean iguales se deben iterar los valores de los puntos de baja dimensión buscando minimizar la divergencia de Kullback Leibler [Kullback, 1951] entre la distribución gaussiana en el espacio de alta dimensión y la distribución t de Student en el espacio de baja dimensión:

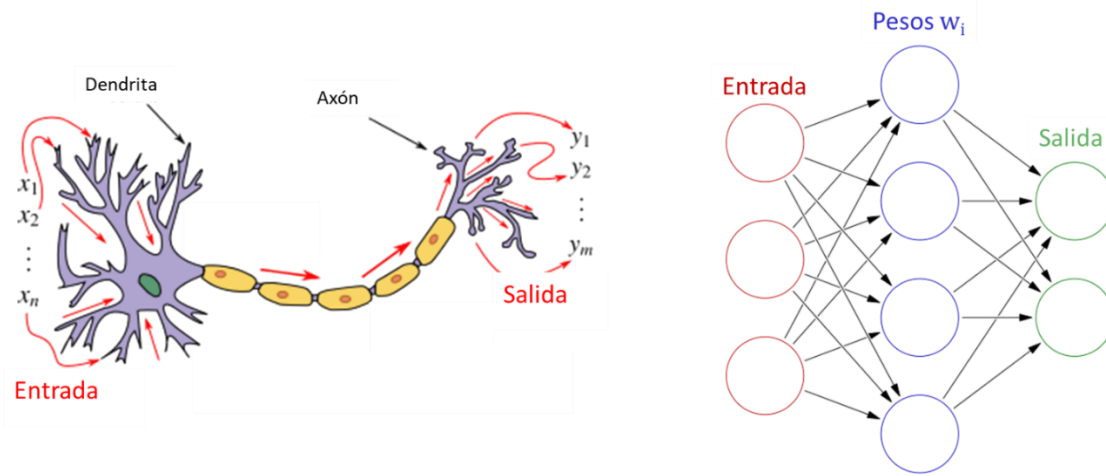
$$KL(P||Q) = \sum_{i \neq j} p_{ij} \log \frac{p_{ij}}{q_{ij}} \quad (13)$$

El resultado es la optimización de un mapa que refleja las similitudes entre la matriz de alto número de variables.

### 4.3. Redes Neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) están inspiradas en el comportamiento de las neuronas biológicas del cerebro humano. Cada neurona biológica puede procesar  $10^3$  a  $10^4$  señales de entrada en paralelo, lo cual las hace muy eficientes en relación a las computadoras que trabajan mayoritariamente en serie. Este tipo de algoritmos realiza una simplificación del trabajo que efectúan las neuronas reales en sus entradas y salidas. En la Figura 32 se puede observar una comparación entre ambas, donde las dendritas corresponden actúan como el vector de entrada de la neurona artificial, la información se reúne en el núcleo y realiza un determinado procesamiento y posteriormente sale una

única señal por el axón que en cierta manera reúne las características de todas las señales de entrada.



**Figura 32.** (Izquierda) Esquema de las redes neuronales biológicas. (Derecha) Diagrama de las redes neuronales artificiales.

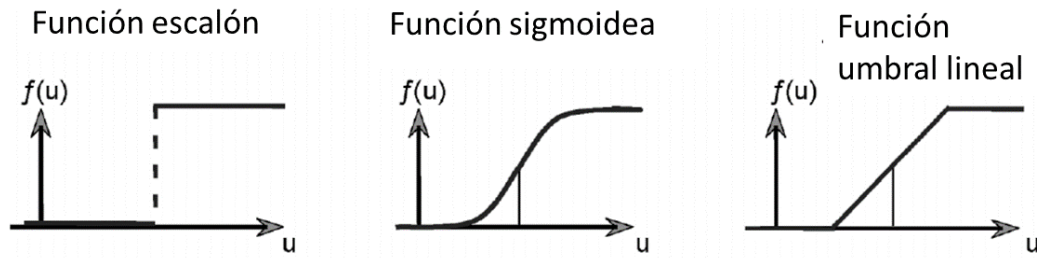
En la figura anterior se pueden observar las señales de entrada ( $x_i$ ) que pasan por los moduladores llamados **pesos** ( $w_i$ ). Por lo que la señal resultante (también llamado *net*) será

$$y_i = \sum_i w_i x_i \quad (14)$$

Por lo que la señal total que llega al núcleo será la suma de las intensidades de señal de cada dendrita individual. Es común introducir un nuevo peso y una señal constante igual a 1 llamado *bias* (denotado con la letra  $\varphi$ ), resultando

$$y_i = \sum_i w_i x_i + \varphi \quad (15)$$

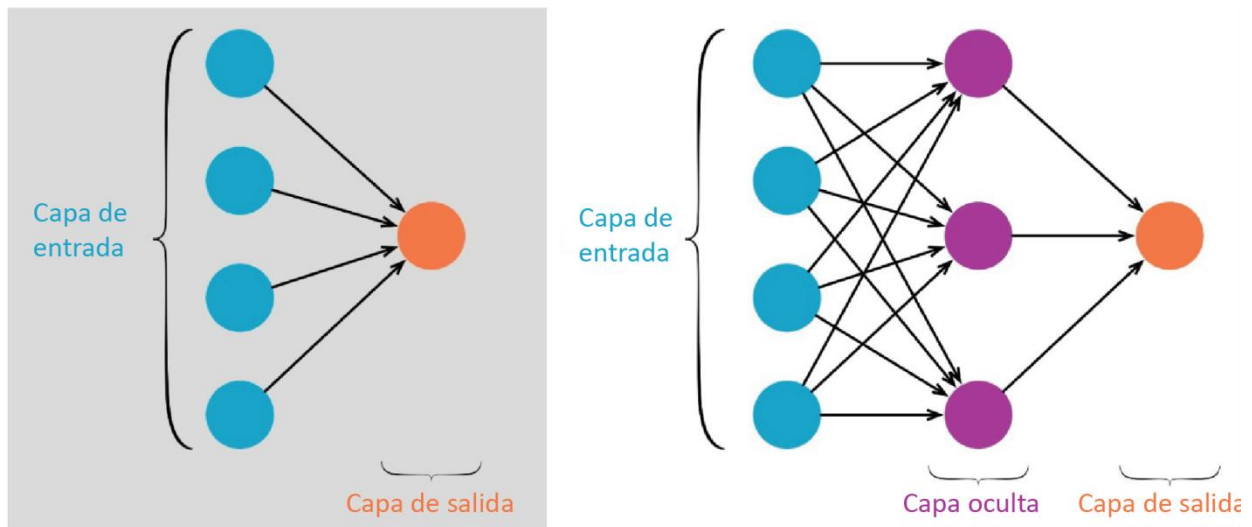
El núcleo de las neuronas suele ser dividido en dos partes: el valor de la señal entrante y la **función de transferencia (FT)**. La importancia de las FT radica en darle distintas propiedades a la respuesta de la red y la capacidad de resolver problemas no lineales [Priddy, 2005]. En la Figura 33 se pueden observar algunas de las funciones de transferencia más utilizadas: la función escalón, sigmoidea y umbral lineal. La velocidad de cálculo dependerá del tipo de FT que se implemente.



**Figura 33.** (De izquierda a derecha) Gráficos de la función escalón, sigmoidea y umbral lineal.

Si la señal resultante supera un determinado valor, la salida será 1, caso contrario será 0 o -1. A este umbral usualmente se lo llama  $\sigma$ .

Existen redes de una y otras con múltiples capas de neuronas. En el caso de estas últimas, las señales de salida de las neuronas se transmiten a la capa inferior pero nunca dentro de la misma capa de neuronas (Figura 34). El tamaño de la red y la cantidad de capas de las neuronas se denomina arquitectura de la red. Para definir estas variables, se debe conocer cuál es la función que se desea que la red ejecute.

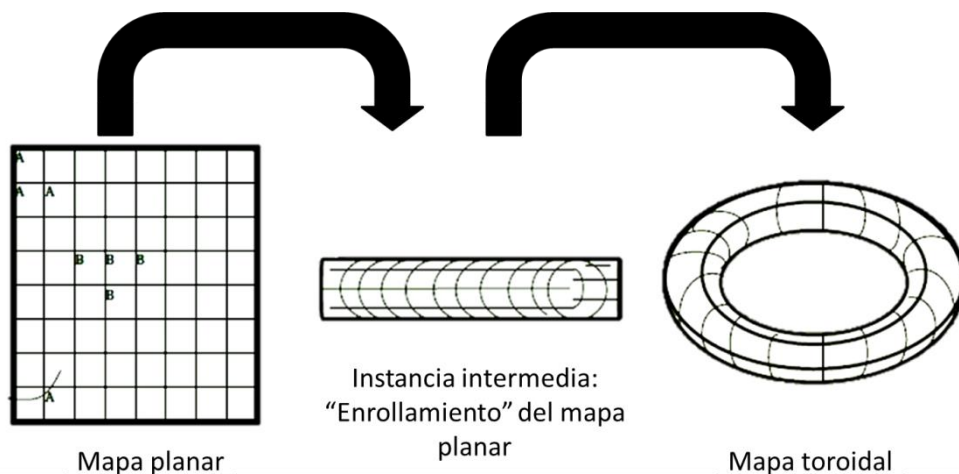


**Figura 34.** Red de una sola capa (izquierda) y red de dos capas (derecha).

### 4.3.1. Mapas auto-organizados

El mapa auto-organizado (SOM) es un tipo de red neuronal que tiene una sola capa de neuronas, y su etapa de entrenamiento es no supervisado. Esto implica que solo se introduce la matriz de datos a la entrada a la red neuronal. No hay una salida ideal proporcionada por el usuario. Debido a esto, el SOM aprende a agrupar o mapear sus datos en un número específico de clases [Heaton, 2012]. Esto significa que la red no

tendrá en cuenta la relación que existe entre cada objeto y la respuesta verdadera, sino que la red trabaja de manera totalmente independiente [Magallanes, 2011]. Al igual que el PCA y el SNE, el SOM es una herramienta de reducción dimensional para la interpretación de los problemas. Su manera de clasificar los objetos es disponerlos en una superficie cuadrículada y mientras más semejantes sean dos objetos entre sí, estarán más cerca, pudiendo estar en el mismo casillero. Hay dos tipos de geometría básica que pueden tener estos mapas, planar y toroidal. En la Figura 35 se muestra esquemáticamente cómo se realiza la transformación del espacio planar a un espacio toroidal. En el caso de los mapas planares, la clasificación queda restringida por sus propios límites. En cambio, en los mapas toroidales si un punto se debe clasificar por fuera del mapa, pasa al otro extremo.



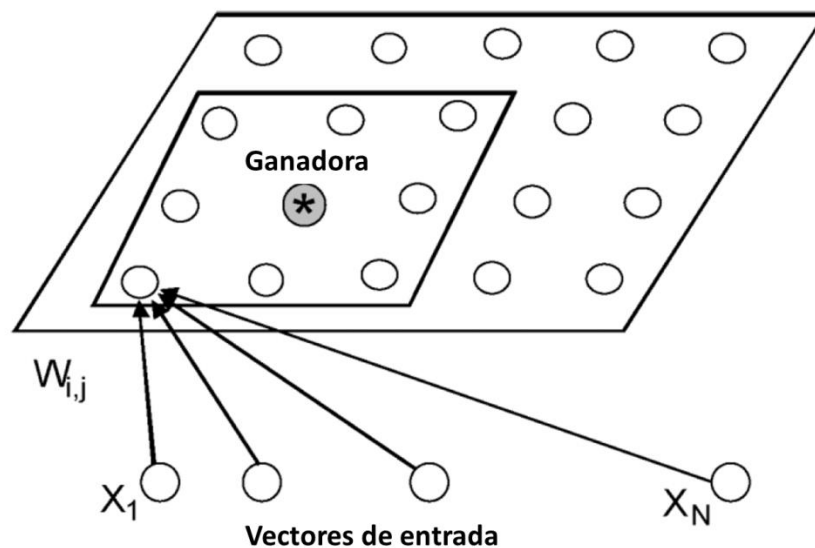
**Figura 35.** Transformación de un mapa de geometría planar a una toroidal.

Cada cuadro de la grilla representa una única salida de una neurona, por lo tanto se tendrá en la red tantas neuronas como cuadros. Cada neurona está conectada a todas las capas de entrada. Un objeto que se introduce a la capa de entrada está descrito por los parámetros que lo caracterizan, por lo que cada neurona tiene un número de entradas igual al número de variables que describen a los objetos [Folguera, 2015].

Cuando un objeto es presentado a la red responderán todas las neuronas pero ganará solo una, que anulará la salida de las demás. La salida de la neurona que ha respondido indica la posición del objeto en la red. La neurona que responde con una señal no nula se selecciona mediante aprendizaje competitivo. Una de las formas de realizar esto sería seleccionar una neurona cuya señal resultante sea el mayor de todos, y todas las salidas restantes serán anuladas. Otra manera de elegir las ganadoras es buscar aquella neurona cuyos pesos sean los más parecidos a los parámetros de entrada de un objeto. El algoritmo que describe a la neurona ganadora C es:

$$C_{ganadora} = \text{mín} \left[ \sum_{i=1}^m (x_{s,i} - w_{j,i})^2 \right] \quad (16)$$

donde  $j$  corresponde a las neuronas e  $i$  a las señales de entrada. Una vez que se seleccionó la neurona ganadora  $C$ , sus pesos se corrigen de forma proporcional al valor de la señal de entrada. Pero no solamente se corrige  $C$ , sino los pesos de las neuronas vecinas, en proporción a sus distancias respecto de  $C$  (Figura 36). La intención de esta corrección es que toda la zona cercana a la neurona ganadora tenga características similares. Las forma de esta corrección pueden ser mediante distinto tipo de funciones: lineal, gaussiana y triangular. Dentro de cada una de estas funciones se puede elegir la cantidad de vecinos que se desean afectar con cada neurona ganadora. Una vez que el lote de datos ha sido pasado por la red, se dice que ha completado una época. Para que la red converja, se debe procesar varias épocas.

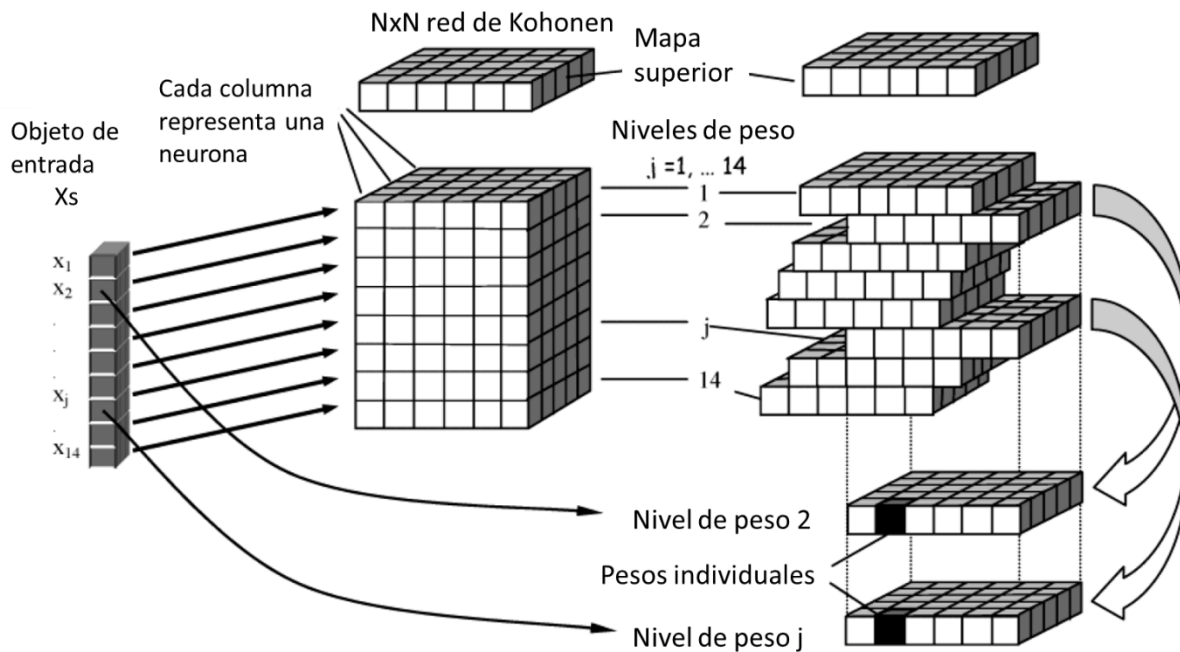


**Figura 36.** Neuronas vecinas que se ven afectadas a partir de una neurona ganadora.

Este tipo de mapas no solamente agrupan los resultados que el algoritmo considera similares, sino que permite ver las similitudes y diferencias dentro de los mismos *clusters* obtenidos. La aplicación de las redes de Kohonen es muy variada, permitiendo la agrupación de datos o bien la obtención de datos faltantes en matrices multidimensionales [García-Reiriz, 2011].

En la Figura 37 se representa la manera en la que procesa los datos entrantes el algoritmo. El resultado final es el SOM de dimensiones predeterminadas por el usuario, denominado **mapa superior**. También podemos obtener el grado de injerencia de cada una de las variables en la construcción del mapa, representado en la imagen como las

“rebanadas” del mapa, denominados **niveles de peso** y tendremos tantos mapas como variables. La variable que más modifique la distribución de las variables de entrada será la que cubra una menor área en el mapa, siendo muy relevante en una zona muy precisa del mapa.



**Figura 37.** Mapas auto-organizados y la red de Kohonen

La complejidad de este tipo de procesamiento radica en la gran cantidad de variables que se deben modificar para llegar a una solución óptima. A continuación, se detallan las variables más frecuentes encontradas en los mapas de Kohonen.

- **Cantidad de épocas:** el usuario debe fijar la cantidad de iteraciones que se deben realizar sobre el mapa para que éste converja.
- **Geometría:** Corresponde a las geometrías descritas anteriormente, planar y toroidal. Esto definirá la manera en la que se agrupan los datos dentro del mapa.
- **Número de neuronas utilizadas:** Usualmente se especifica cuántas filas y cuántas columnas debe tener el mapa. Esto depende de la cantidad de datos que se tengan y de la cantidad de *clusters* que se busque obtener.
- **Cantidad de vecinos:** Es el número de vecinos aledaños que se verán afectados cuando gane una determinada neurona.
- **Función de corrección:** Qué función se aplica a los vecinos aledaños. Comúnmente se utiliza constante, triangular y gaussiana.

- **Actualización de los pesos (TCF):** puede ser por época, por vector de entrada o por ambas
- **Tipo de neurona ganadora:** Se puede seleccionar entre la que tiene la salida más grande o la que tiene la salida más parecida al dato de entrada
- **Máximo y mínimo corrección de pesos:** El usuario deberá seleccionar cuáles desean que sean estos valores.

# Capítulo 5: Caracterización de la propagación de onda sobre una estructura tipo sándwich

En este capítulo se describen las mediciones que se realizaron para la caracterización de la propagación de ondas elásticas sobre un material de estructura sándwich. Se realizó una medición de la velocidad de propagación, la atenuación en función del tiempo y la isotropía en el plano. Estas mediciones se efectuaron para conocer el comportamiento del material cuando se utiliza una fuente simulada de EA mediante el método Hsu-Nielsen con el fin de caracterizar sus propiedades.

## 5.1. Mediciones de la velocidad de propagación y de la atenuación

### 5.1.1. Método Experimental

En primer lugar se midieron la velocidad de propagación y la atenuación de las ondas en la estructura tipo sándwich, utilizando el método Hsu-Nielsen para generar una fuente simulada de EA. A partir de este método, se colocaron dos sensores de EA y se simuló la fuente sobre la línea recta descrita y acotada por la posición de ambos sensores. Conociendo la distancia entre ellos y la de uno a la fuente de EA se pudo obtener la velocidad de propagación de la onda a partir de la ecuación 17.

$$v = \frac{2x - L}{D_t} \quad (17)$$

donde  $x$  es la posición de la fuente y  $D_t$  es la diferencia de tiempos entre las llegadas (y disparo) a ambos canales respectivamente. En la Figura 38 se exhibe un esquema de la medición realizada y en la Figura 39 una foto de la medición real.

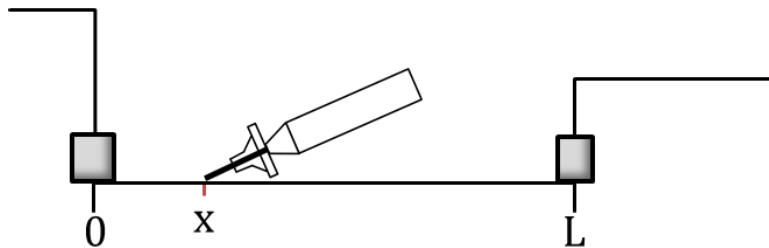
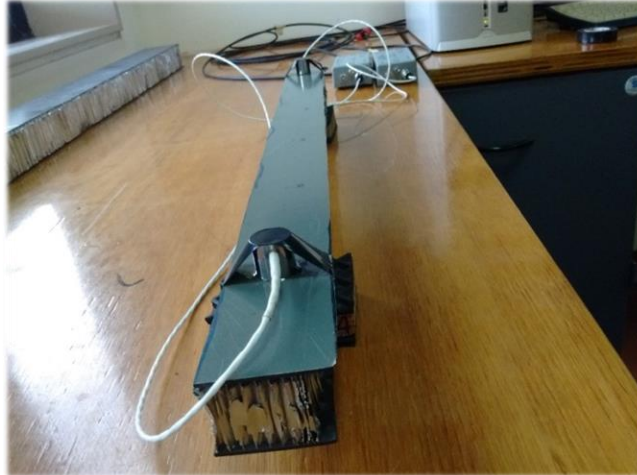


Figura 38. Esquema de la medición.



**Figura 39.** Medición de la velocidad de propagación sobre una muestra de estructura tipo sándwich.

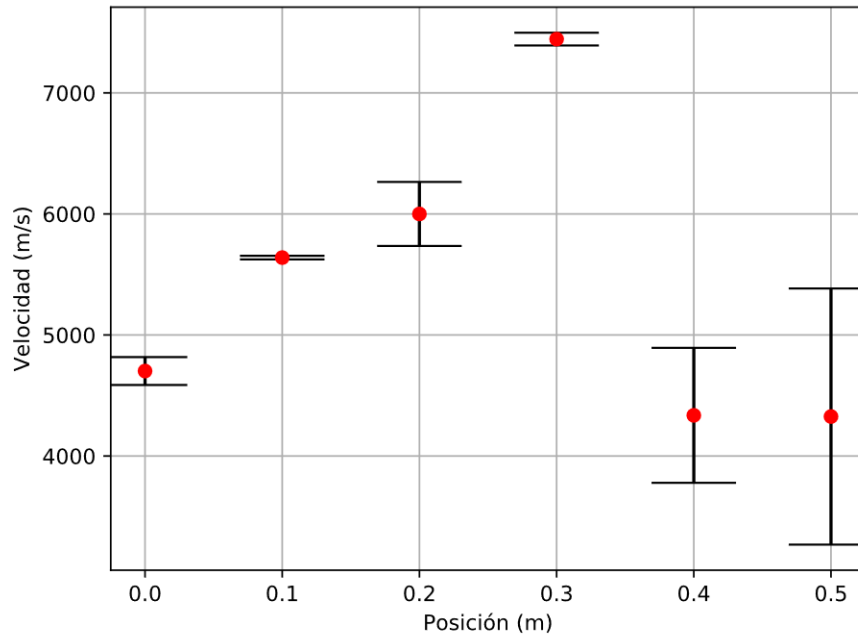
Se utilizaron dos probetas, una de 600 mm de longitud por 40 mm de ancho y la otra de 1460 mm de longitud por 90 mm de ancho, realizándose 4 mediciones con ambos sensores en la misma cara y otra con los sensores en diferentes caras.

### 5.1.2. Resultados y Discusión

En todos los casos se pudo observar un comportamiento similar exhibido al de la Figura 40 para la velocidad de propagación en función de la posición de la fuente de EA. A medida que la fuente se va alejando de un sensor, puede verse cómo varía el resultado incrementando el valor de la velocidad. Esto puede deberse a varios factores:

- Las ondas se propagan de manera dispersiva en la placa de CFRP debido a su geometría y dimensiones.
- Al utilizar los parámetros de EA no se tiene en cuenta qué tipo de ondas son las que está considerando el equipo para parametrizarla, pudiendo detectar distintos tipos de ondas (P, S, R, Lamb de distintos órdenes) a medida que se propaga a diferentes distancias.
- La anisotropía del material.

Según Prosser [Prosser, 1995] la posición de la fuente afectará las características de la onda de EA emitida. En el caso del método Hsu-Nielsen se podrá excitar perpendicularmente al panel o sobre uno de sus bordes, favoreciendo la propagación de uno u otro modo de las ondas de Lamb. Esta es otra variable a tener en cuenta para el análisis de la propagación de la onda.



**Figura 40.** Velocidad en función de la posición.

Por otro lado, como se ve en el trabajo realizado por Benmedakhene [Benmedakhene, 2001] en el cual se analiza el comportamiento de laminados unidireccionales de fibra de vidrio, en algunos casos se llega a resultados análogos utilizando sistemas similares para la excitación del material estudiado. Lo distintivo de este trabajo fue la separación de ambos modos de Lamb contenidos en el *burst* de EA que se propaga a través del material, permitiendo analizar la velocidad de cada uno, y obteniendo resultados similares en las diferentes distancias de excitación de la fuente.

Debido a la alta complejidad de este material, resulta difícil determinar la velocidad de propagación de las ondas mecánicas. Es necesario desarrollar un método alternativo para poder definir la velocidad de propagación de cada tipo de ondas en cada uno de los sentidos de las fibras visualizando las formas de onda obtenidas mediante el equipo de EA y separando cada uno de los modos que se propagan a lo largo del material. .

En cuanto a la atenuación, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 41. A su vez, se calcularon las pendientes de cada uno de los gráficos para luego obtener la atenuación promedio en función de la distancia, dando como resultado una atenuación

$$A = 0.9687 \frac{dB}{cm}$$

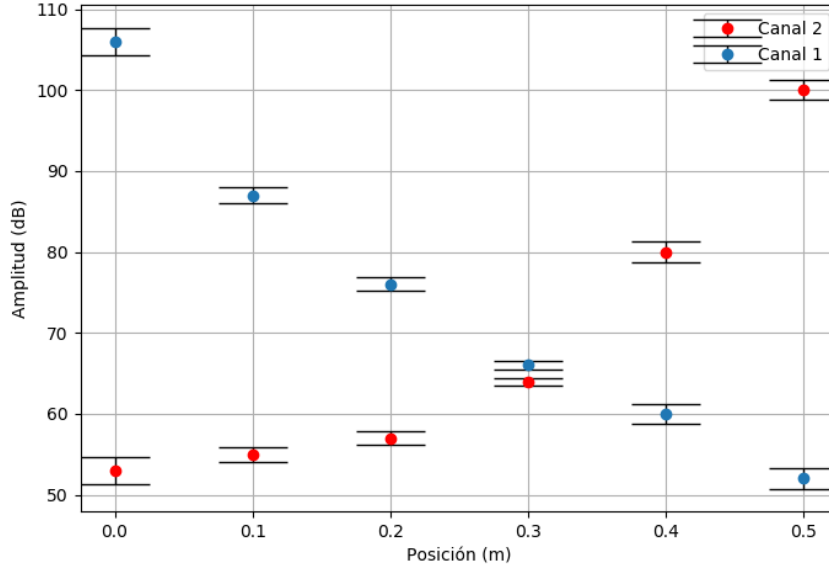


Figura 41. Amplitud en función de la posición.

## 5.2. Atenuación en función de la frecuencia

### 5.2.1. Método experimental

Se buscó conocer la atenuación del medio en función de la frecuencia de la onda, a partir de ecuación 18 obtenida por Asamene [Asamene, 2015]

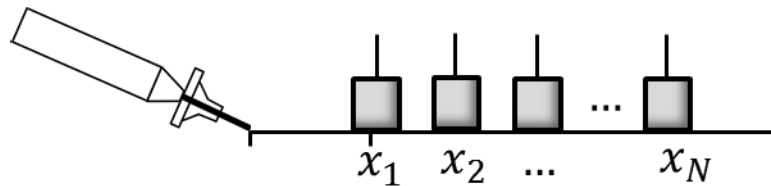
$$V_m = \left( \frac{1}{\sqrt{x_i}} \right) V e^{-\alpha x} \quad (18)$$

Donde  $x_i$  es la posición de la fuente,  $V$  la tensión recibida por el equipo y  $\alpha$  el coeficiente de atenuación del material.

Si se incrementa la cantidad de posiciones de la fuente, la medición será más precisa. Utilizando  $N$  posiciones de la fuente se puede obtener el coeficiente de atenuación  $\alpha$  a partir de la ecuación 19

$$\left\{ \begin{matrix} -\alpha \\ \ln(V) \end{matrix} \right\} = \left[ \begin{matrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i & N \end{matrix} \right]^{-1} \left\{ \begin{matrix} \sum_{i=1}^N x_i \ln(V_{mi} \sqrt{x_i}) \\ \sum_{i=1}^N \ln(V_{mi} \sqrt{x_i}) \end{matrix} \right\} \quad (19)$$

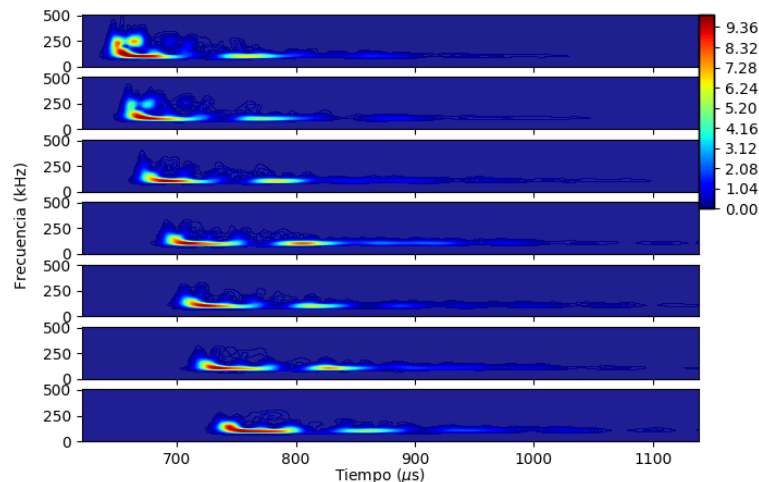
En esta medición se utilizó una probeta del mismo material en la cual se realizaron fuentes en un número de  $N = 7$  posiciones. En la Figura 42 se muestra el esquema del experimento realizado, en el cual se utilizó el método Hsu-Nielsen para simular la fuente de EA. Se excitó el panel a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  de los sensores de EA con respecto a la orientación de las fibras.



**Figura 42.** Esquema de la medición de atenuación.

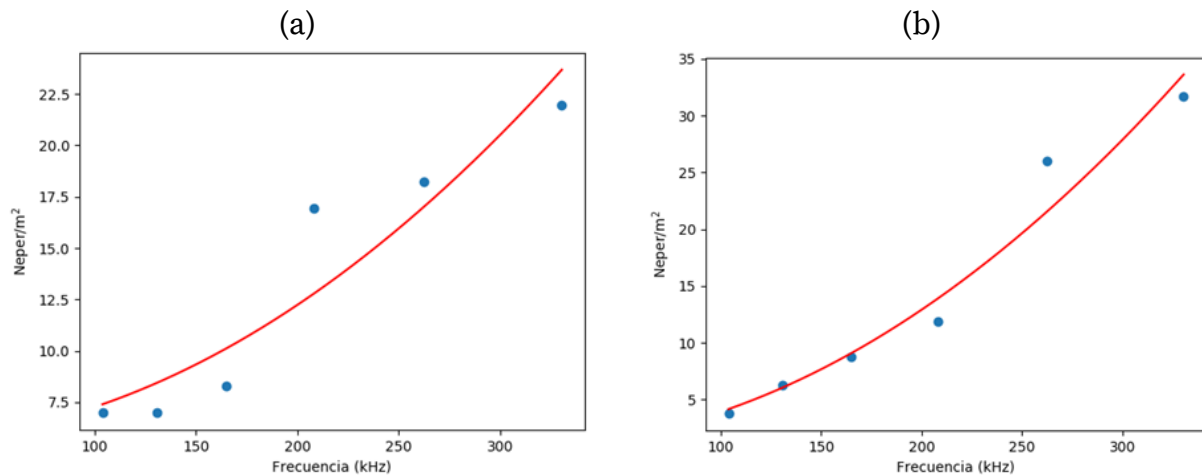
### 5.2.2. Resultados y Discusión

Se realizó la transformada ondita de cada una de las FO. Si se observa la Figura 43, se puede notar cómo decrece el contenido de alta frecuencia a medida que la distancia entre la fuente y el sensor disminuye.



**Figura 43.** Transformada Ondita de cada una de las FO medidas.

Luego se tomaron los valores de Amplitud, y a partir de la Ec. 19 se obtuvieron los coeficientes de atenuación del material para distintas frecuencias en el rango de 100 a 400 kHz, corroborando el aumento de la atenuación a medida que la frecuencia aumenta (Figura 44). Comparando ambos gráficos, se puede observar que la orientación a  $90^\circ$  presenta una menor atenuación a 100 kHz pero a 400 kHz una atenuación mayor que la orientación a  $0^\circ$ . Este fenómeno resulta extraño ya que la disposición de las fibras de CFRP para la orientación a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  debería resultar simétrica ya que la disposición del multilaminado lo es.

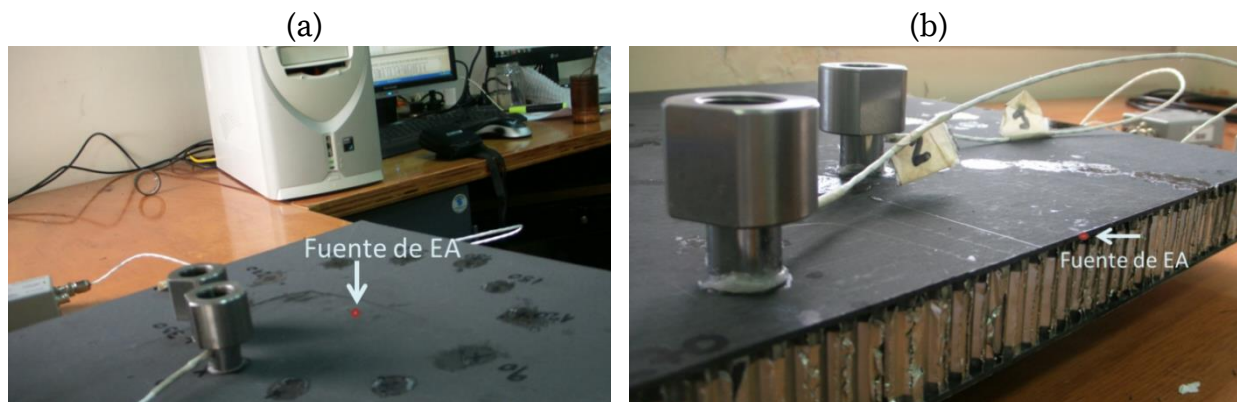


**Figura 44.** Coeficiente de atenuación genuina en función de la frecuencia para orientación a 0° (a) y a 90° (b) con respecto a la orientación de la fibra.

### 5.3. Isotropía

#### 5.3.1. Método experimental

A partir de las probetas se realizaron mediciones del patrón polar para analizar el grado de isotropía de la estructura tipo sándwich. Se realizaron dos mediciones, la primera excitando fuera del plano (*out of plane*) y la segunda excitando en el plano (*in plane*). Se realizó un círculo y se excitó, mediante Hsu-Nielsen, desde el centro del mismo. Para poder realizar esta medición, se utilizaron dos sensores (Figura 45). En el primer canal se utilizó un sensor de referencia situado a 0° y un segundo sensor, el cual va describiendo un círculo a pasos de 15° por cada medición. Sobre cada ángulo se realizaron 8 mediciones, con el objetivo de promediar las señales y obtener un valor más representativo.



**Figura 45.** Medición de patrón polar (a) fuera del plano y (b) en el plano.

### 5.3.2. Resultados y Discusión

Para realizar el procesamiento de datos se tomó el parámetro Amplitud. Sobre cada ángulo se promediaron los ocho valores medidos para cada uno de los dos canales, y sobre estos valores promediados se realizó un cociente entre el canal 2 y el canal de referencia, obteniendo un valor de amplitud relativo para cada ángulo medido. En la Figura 46 se puede observar el patrón polar para la excitación fuera del plano. Se puede ver que las amplitudes recibidas entre los  $0^\circ$  y el resto de los ángulos son prácticamente iguales.

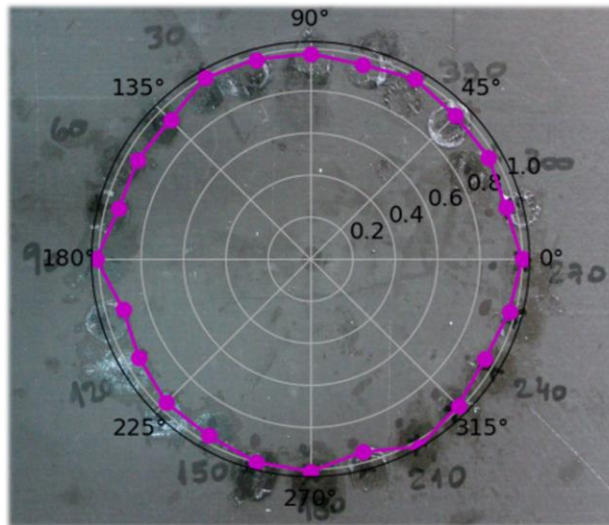


Figura 46. Patrón polar excitado fuera del plano.

En el caso de la excitación en el plano (Figura 47), se observa un comportamiento disímil en los extremos del panel. Esto puede deberse a la anisotropía del material, o bien puede deberse a que la señal también se propaga por los bordes del panel, generando un efecto no deseado en la medición pero que en ciertos procesos de mecanizado (como el fresado) podrían suceder.

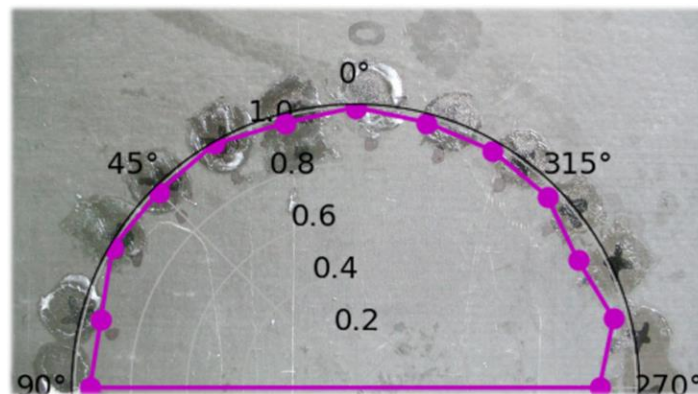


Figura 47. Patrón polar fuera del plano.

# Capítulo 6: Caracterización de las etapas del proceso de mecanizado con EA

## 6.1. Método Experimental

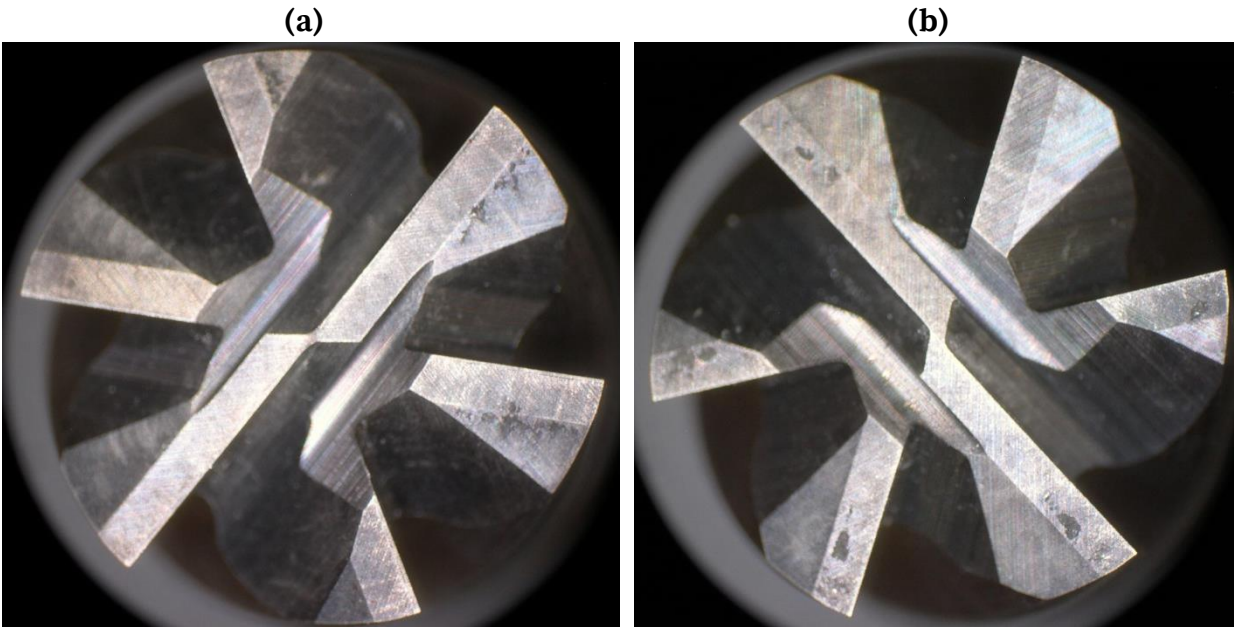
En esta primera medición se estudió la propagación de las ondas elásticas generadas durante el mecanizado de un panel tipo sándwich de 1140 mm de longitud por 161 mm de ancho, con un núcleo tipo panal de abejas de aluminio 5052 y dos caras, una de cada lado de un multilaminado de CFRP de 24 capas con la disposición [0, 30, 60, 90, -30, -60]<sub>2s</sub> de 1,536 mm de espesor cada una.

Para realizar este ensayo se utilizaron dos fresas helicoidales duales Sandvik Coromill Plura (2P460-OA) como la exhibida en la Figura 48. Esta herramienta tiene un recubrimiento de Nitruro de Titanio Aluminio (Ti,Al)N<sub>2</sub> realizado mediante PVD. El diámetro de corte de la fresa es de 7,938 mm y su longitud de 63,5 mm. Este tipo de herramientas fueron ideadas especialmente para el mecanizado de materiales compuestos debido a su geometría, y al recubrimiento específicamente diseñado para mecanizar con altas velocidades de avance y giro, permitiendo un acabado suave sin rugosidad [Sandvik, 2019].

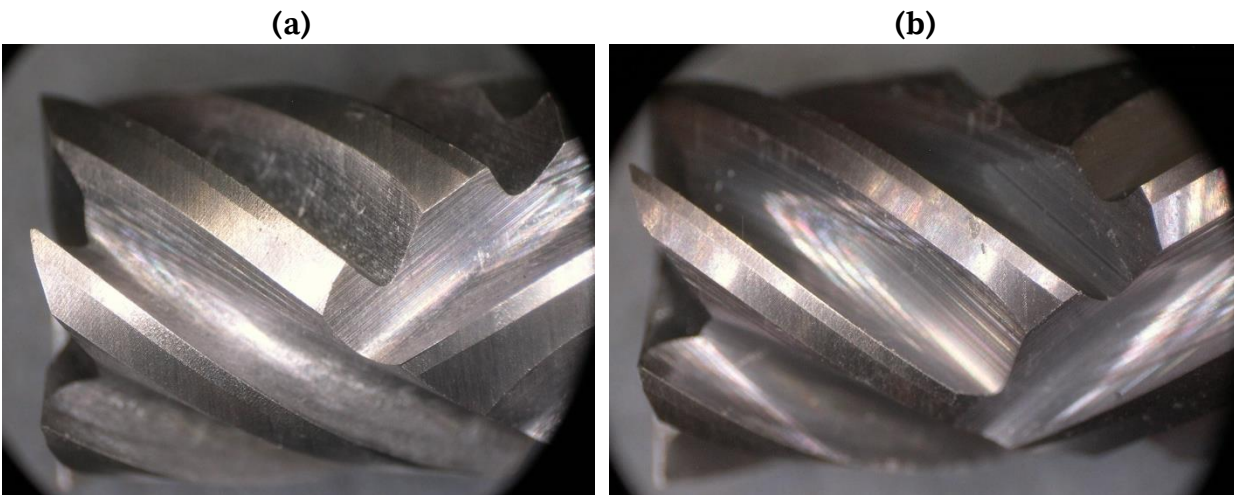


**Figura 48.** Fresa utilizada para el mecanizado de las muestras de la estructura sándwich.

Previo al mecanizado se realizó una inspección bajo lupa para determinar el estado de las herramientas con el objetivo de seleccionar dos de estas con un desgaste disímil. En la Figura 49a se observa la punta de la herramienta con mayor uso (denominada **HU**), en la cual se puede ver un mayor desgaste en su flanco y en la Figura 49b una donde el desgaste es apenas perceptible (denominada **HN**), En los laterales de la herramienta no se encontraron diferencias notorias. (Figura 50).

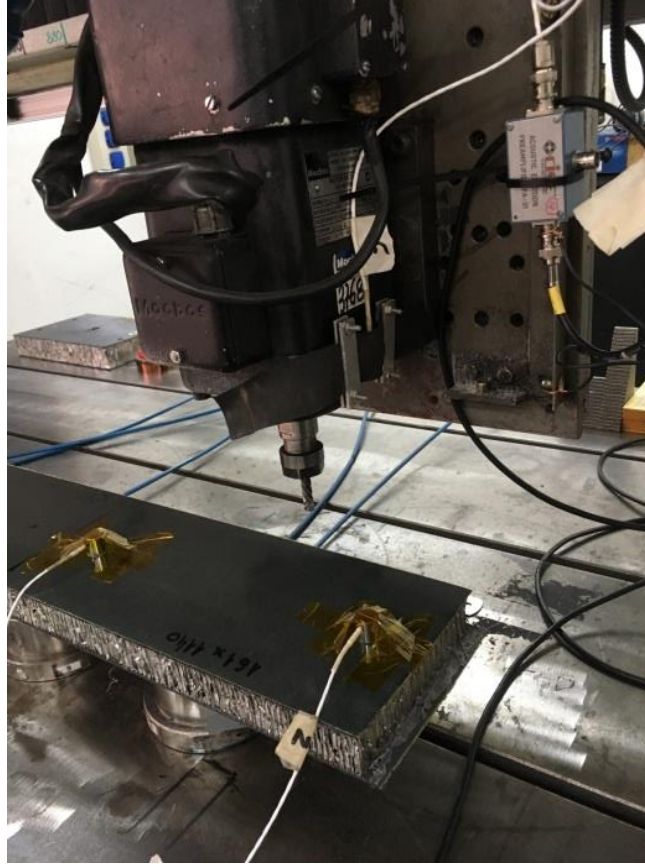


**Figura 49.** Imagen frontal de las dos herramientas utilizadas en la medición. (a) Broca con mayor uso, (b) broca con menor uso.



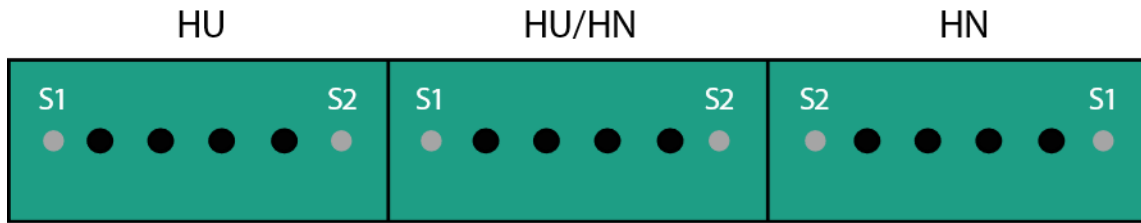
**Figura 50.** Imagen lateral de las dos herramientas utilizadas en la medición. (a) broca con mayor uso, (b) broca con menor uso.

Para realizar el mecanizado del panel se utilizó una máquina CNC de tipo industrial (Figura 51), con una velocidad de avance de la herramienta de 250 mm/min y una velocidad de rotación de 8.000 RPM.



**Figura 51.** CNC y muestra de panel tipo sándwich.

Se realizaron 12 agujeros de 10 mm de diámetro. Para cada uno de estos, en primer lugar, se realizó un agujero del diámetro de corte de la herramienta y luego se continuó con un fresado hasta llegar a medida. El panel fue dividido a lo largo en tres partes iguales, con el objetivo de realizar dos mediciones simétricas de cuatro agujeros en dos de los tres sectores, utilizando las fresas HU y HN, respectivamente. La simetría mencionada se buscó para evitar efectos de la geometría en la comparación de los resultados de los procesos realizados con fresas nueva y gastada. En el centro del panel se realizaron dos agujeros con la fresa HU y otros dos con la HN, procurando también mantener la simetría de la secuencia en el proceso de mecanizado. En la Figura 52 se observa un dibujo esquemático de la disposición de los sensores de EA y los agujeros efectuados. El sensor 1 (denominado S1) fue colocado a la mitad del ancho del panel y a una distancia de 50 mm del borde. El sensor 2 (denominado S2) fue colocado a 50 mm del tercio del material correspondiente. El espaciado entre los agujeros fue de 68 mm y la distancia entre el primer agujero y los sensores de 44 mm. Cada uno de estos ensayos fue filmado a una tasa de 60 cuadros por segundo con un iPhone modelo SE, el cual se sincronizó a la señal de EA con un error de 1/60 s.

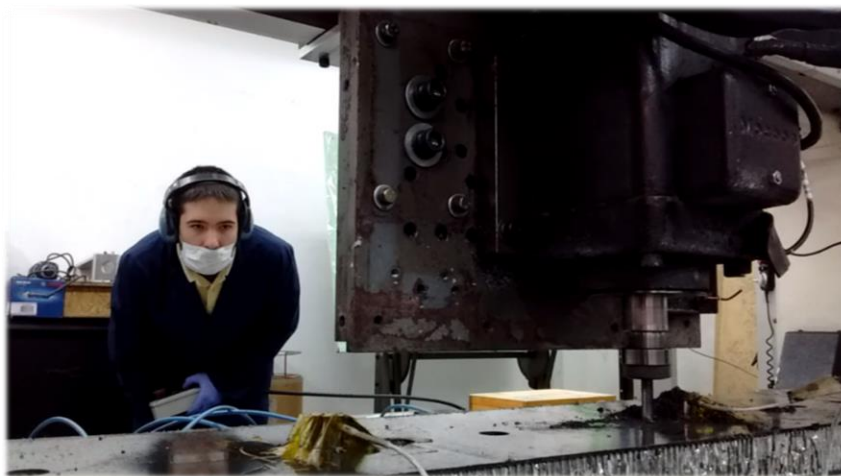


**Figura 52.** Disposición de los agujeros y los sensores.

Se utilizaron dos sensores de banda ancha y dos preamplificadores de la marca PAC (Physical Acoustics Corporation). Como acoplante entre el panel y los sensores de EA se utilizó vaselina sólida y para fijarlo al mismo, cinta kapton, como se puede observar en las Figura 53 y Figura 54.



**Figura 53.** Colocación de los sensores de EA.



**Figura 54.** Realización del mecanizado.

La adquisición de los datos se realizó con un equipo marca PAC modelo PCI-2, muestreando a 5 MHz y con una resolución de 18 bits en la parametrización. Se utilizaron los modos de adquisición de parámetros característicos de EA y de formas de onda. Los datos fueron almacenados en formato ASCII.

#### 4.3.2. Procesamiento de datos

Para poder visualizar y diferenciar las etapas del mecanizado se utilizó un programa desarrollado de manera modular en el lenguaje de programación Python, con el que se efectuó el acondicionamiento, procesamiento y gráficos de los datos de EA a lo largo de todo el trabajo. Para la realización de este desarrollo se utilizaron una serie de bibliotecas complementarias:

- **Pandas:** Permite abrir los archivos de texto y trabaja con *DataFrames*. El formato que utiliza es similar a una hoja de cálculo o al funcionamiento de una base de datos [Pandas, 2018].
- **Numpy:** módulo matemático de Python, permite hacer operaciones de manera optimizada utilizando todas las prestaciones del PCU de la computadora. En cuanto a su sintaxis, busca tener una lógica similar a Matlab [Ascher, 1999].
- **Matplotlib:** Permite realizar los gráficos en Python [Matplotlib, 2018].
- **Scikit-Learn:** Esta biblioteca es de Machine Learning. Utilizada para realizar los PC y SNE [Pedregosa, 2011].

Debido a las características del ensayo, donde los sensores estaban fijos y los agujeros se iban realizando en diferentes sectores del panel, las señales obtenidas tienen distinta amplitud. Es por este motivo que se debió realizar la normalización de los datos (individualmente) utilizando una función que representa la normalización min-max (desarrollada en Python) sobre los parámetros de EA para cada uno de los agujeros realizados individualmente. Esta función trabaja con cada una de las columnas de la matriz por separado y realiza la siguiente operación:

$$\frac{X_i - \text{mín}(X)}{\text{máx}(X) - \text{mín}(X)} \quad (20)$$

donde  $X$  es una de las columnas de la matriz de datos y  $\text{máx}(X)$  y  $\text{mín}(X)$  corresponden a los máximos y mínimos de esa columna. Posteriormente se realizó la normalización

de las 4 señales correspondientes al mecanizado de HN tomadas en el canal 1 para uno de los tercios del panel como muestra el ejemplo de la Figura 55.

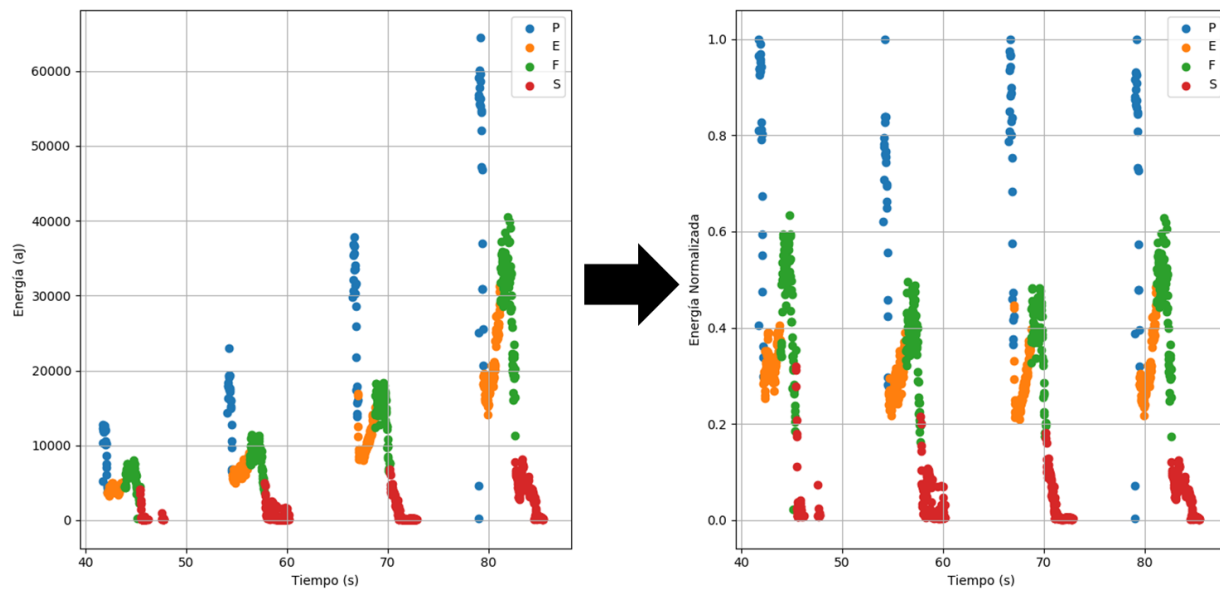
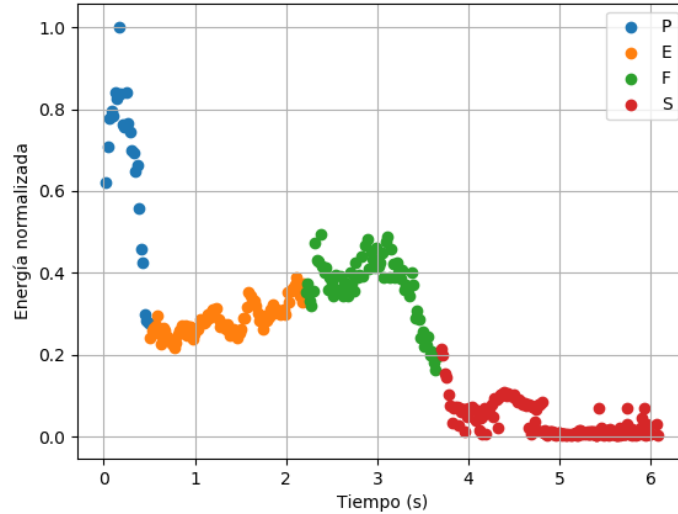


Figura 55. Normalización de la Energía.

## 6.2. Resultados y Discusión

En esta medición se buscó diferenciar las etapas características del proceso de mecanizado sobre el panel utilizando los parámetros de EA. Se tomaron videos del mecanizado con el objetivo de poder distinguir las etapas en la operación y se encontró que podían resumirse en cuatro, que se muestran en la Figura 56, y se describen a continuación

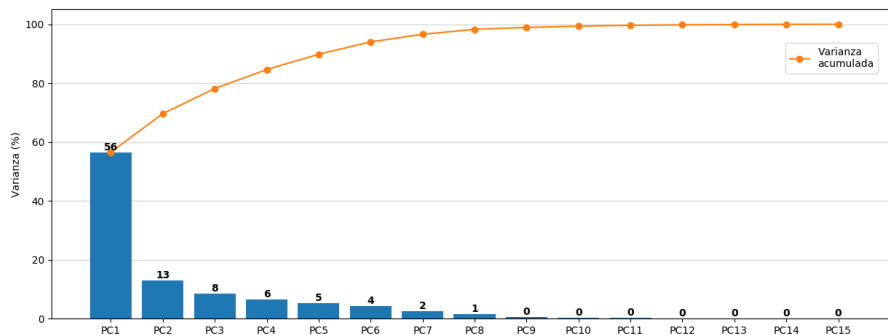
- **Agujereado (P):** Correspondiente al primer medio segundo del mecanizado.
- **Estacionario (E):** Una vez que atraviesa el CFRP la herramienta sigue atravesando el panel (entre 0,5 s y 2,2 s).
- **Fresado (F):** Una vez que la herramienta penetra el multilaminado de CFRP el material comienza el fresado. La operación dura 1,5 s.
- **Salida (S):** Cuando la herramienta sale del material, luego de los 3,7 s.



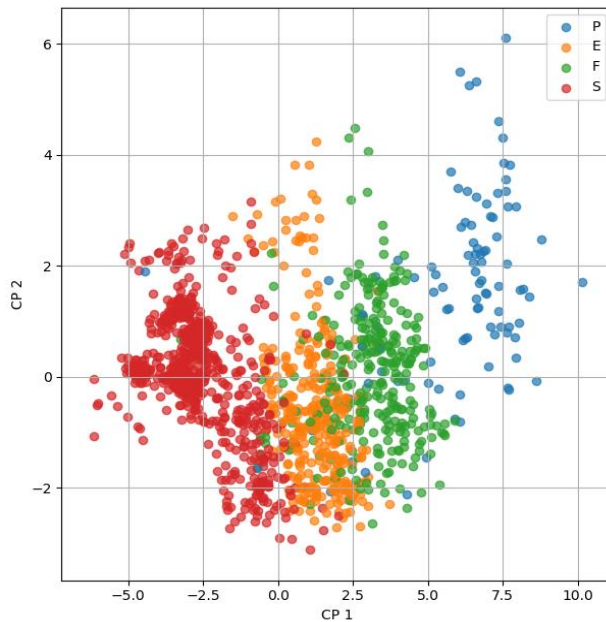
**Figura 56.** Separación de las etapas de mecanizado para HN.

### 6.2.1. Componentes Principales para la clasificación de etapas

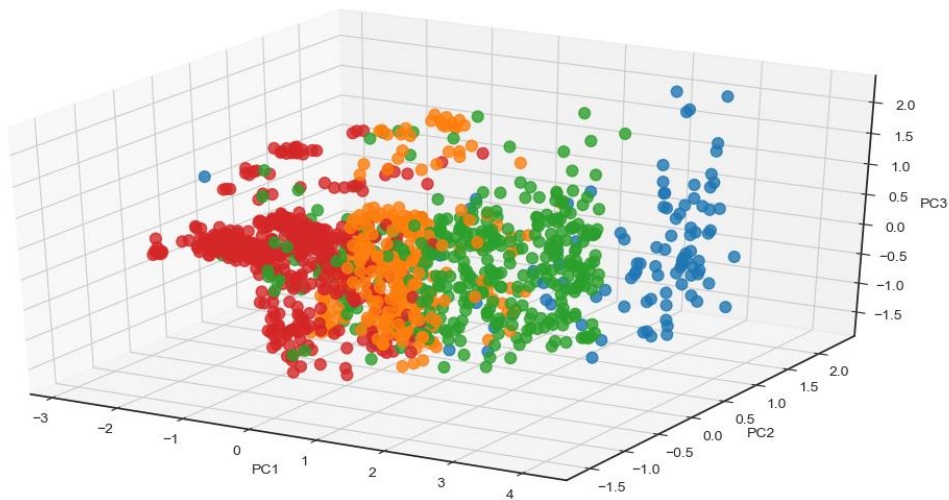
Para el primer análisis de clasificación de etapas se utilizaron los PC a partir de los parámetros de EA obtenidos en la medición. Una vez convertido el archivo de texto obtenido en un *dataframe*, en los parámetros de EA se filtraron las filas con una energía menor a 70 aJ (atto Joule), debajo de la cual se consideraba ruido y no señal. Luego se construyó una matriz de datos (con cada uno de los parámetros de EA normalizados individualmente por cada agujero realizado) y se utilizó el módulo Scikit-Learn para realizar el gráfico de varianza (Figura 57). Como se puede observar, el PC1 tiene mucha mayor información acerca de las etapas que los otros PC, acumulando un 56% de la varianza total, mientras el PC2 tiene un 13% y el PC3 el 8%. Luego se realizó un gráfico en 2 dimensiones de los PC 1 y 2 de la matriz (Figura 58) y también se graficaron los 3 primeros PC en la Figura 59. En ambas Figuras se pueden diferenciar las etapas de mecanizado y podemos ver que tan solo con el PC 1, podríamos clasificar las distintas etapas de mecanizado, lo cual tiene sentido si se compara el gráfico de varianza contra los otros dos gráficos.



**Figura 57.** Gráfico de varianza para HN.



**Figura 58.** PC1 vs PC2 para HN.



**Figura 59.** PC en 3 dimensiones utilizando PC1, PC2 y PC3 para HN.

En particular, es bien distinguible la separación entre fresado y agujereado, además de las distintas etapas del proceso de maquinado en las que no se produce ningún corte.

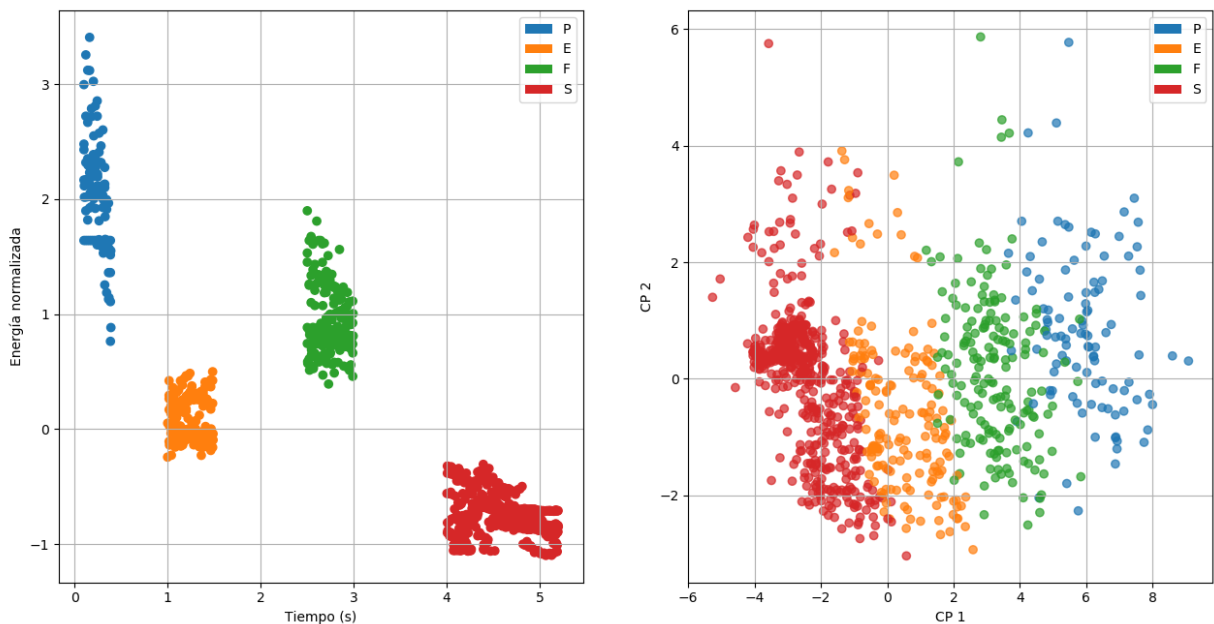
A su vez, se puede observar que hay una división entre el agujereado y las otras etapas en las cuales la herramienta está en contacto con el material de manera lateral (en las etapas estacionaria y salida donde se produce un roce, así como el fresado donde ocurre el corte). Entonces en el caso del agujereado, la acción que se ejerce es mayoritariamente “*out of plane*”, mientras que en los demás casos se excitará al panel en el modo “*in plane*”

Posteriormente se acotaron temporalmente los tramos seleccionados para cada etapa con el objetivo de comprobar si las transiciones afectaban el resultado de los PC. Para esto, se efectuaron los cambios exhibidos en la Tabla 1 y se tomaron los parámetros de EA en los nuevos intervalos

**Tabla 1:** Cambio de tiempos para el análisis de PC

| Etapa        | Tiempo original (s)           | Tiempo recortado (s) |
|--------------|-------------------------------|----------------------|
| Agujereado   | 0 – 0,5                       | 0,1 – 0,4            |
| Estacionario | 0,5 – 2,2                     | 1 – 1,8              |
| Fresado      | 2,2 <- 3,7                    | 2,5 – 3              |
| Salida       | 3,7 – último punto registrado | 4 – 5,2              |

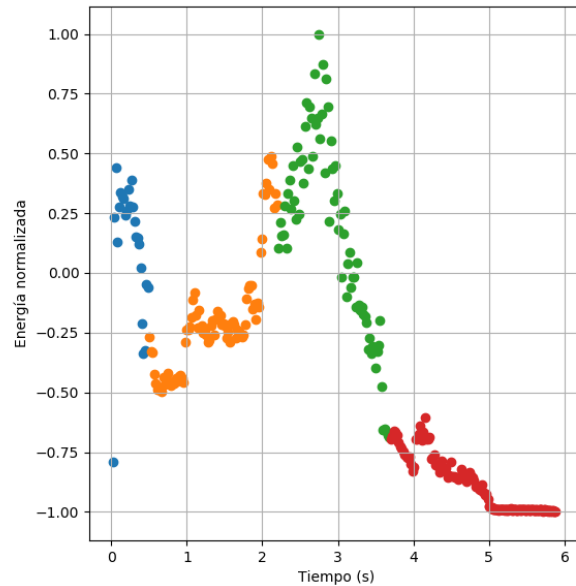
Comparando la Figura 60 con la Figura 54 se puede observar que, si bien todas las etapas de transición se encuentran recortadas, al realizar el PCA no hay una diferencia sustancial en la distribución y agrupamiento de los puntos en el gráfico para cada una de las etapas, lo cual implica que es indistinto realizar este recorte para los PC.



**Figura 60.** PC en 3 dimensiones utilizando PC1, PC2 y PC3 para HN.

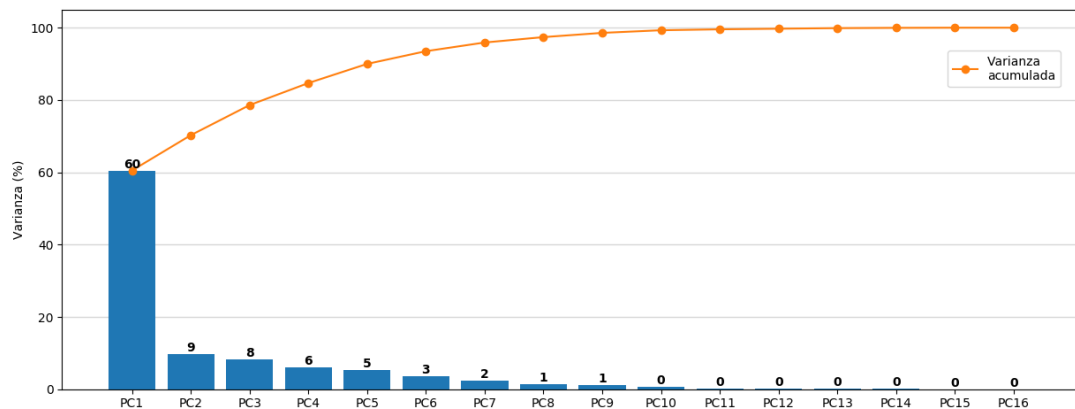
Se realizó el mismo procedimiento para la herramienta con mayor desgaste HU y se lograron separar de igual forma que para el caso HN las etapas características del proceso, como se puede observar en la Figura 61. Luego, haciendo el cociente de la

energía normalizada entre el pico de agujereado y el pico de fresado, para el caso HN (mostrado en la Figura 52) da un valor mayor a la unidad, y para el caso HU menor a 1. Esto representa un indicio de que la señal de EA varía a medida que la herramienta se desgasta.

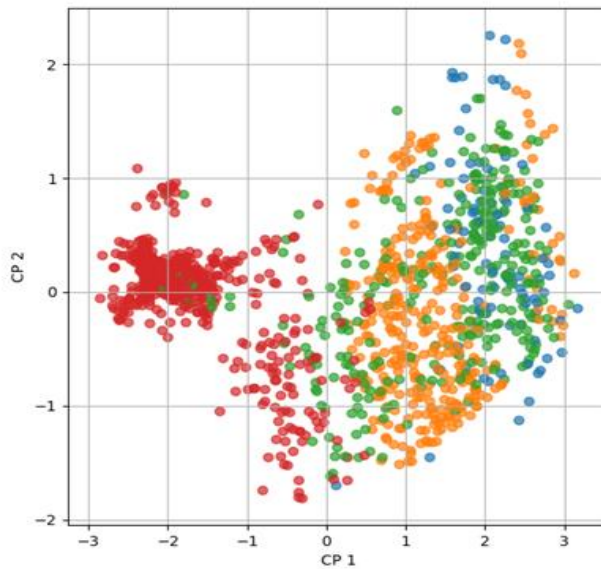


**Figura 61.** Separación de las etapas de mecanizado HU.

Se utilizó el PCA para los parámetros de EA obtenidos a partir del corte con HU. Se obtuvo el gráfico de varianza (Figura 62) en el que podemos ver que el comportamiento es muy similar a HN. En el gráfico de PC (Figura 63) es imposible diferenciar las distintas etapas de mecanizado como sucede con HN. Esto puede corresponderse con la variación en la relación de los picos o a un cambio en el mecanismo de generación de fuentes de EA durante el proceso de corte, en ambos casos debido al desgaste de la herramienta.



**Figura 62.** Gráfico de varianza para HN.



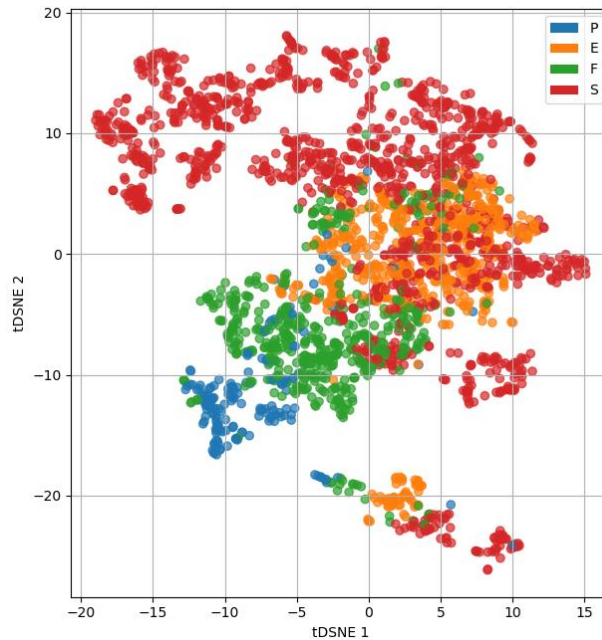
**Figura 63.** Separación de las etapas de mecanizado para HU.

Se puede concluir que la discriminación de etapas mediante PCA resulta efectiva cuando la herramienta tiene poco uso pero insuficiente cuando su desgaste progresa, no siendo un método ideal para este caso de clasificación.

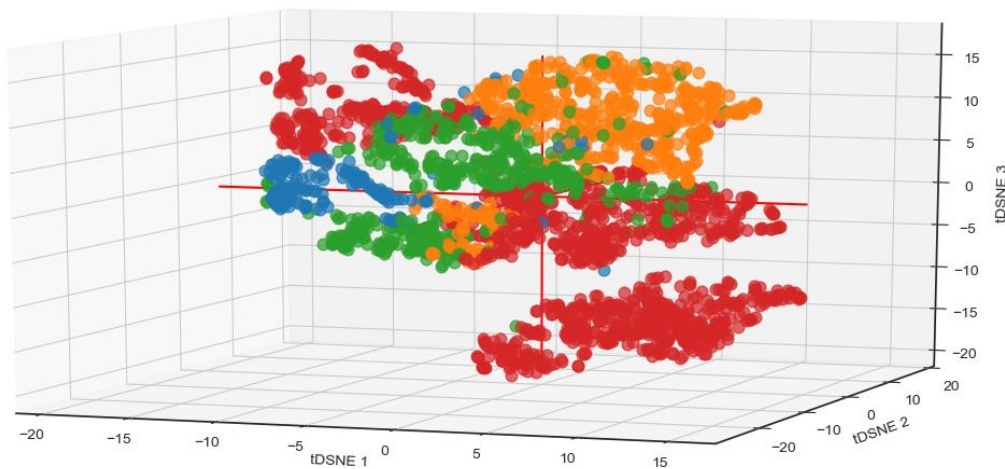
### 6.2.2. Incrustación estocástica de vecinos para la clasificación de etapas

La ventaja de los PC es su velocidad de cálculo, su desventaja es que es un algoritmo que como se mencionó anteriormente, funciona óptimamente reconociendo sistemas lineales. Es por esto que se utilizó el algoritmo de Incrustación Estocástica de Vecinos (SNE), desarrollado para la reducción de variables de señales no lineales (Sección 4.2). Los parámetros de EA para herramientas con diferentes desgastes fueron evaluados en iguales condiciones y con la misma separación por etapas realizada en la Sección anterior.

En la Figura 64 se puede observar un gráfico para las dos primeras variables obtenidas a partir de SNE para el caso de la fresa HN. En esta figura no se observa un agrupamiento claro para las distintas etapas del proceso. Cuando se utilizan 3 variables (Figura 65), las 4 etapas se agrupan de manera más definida, salvo la etapa S que tiene un grupo de puntos dispersos cerca de la etapa F.



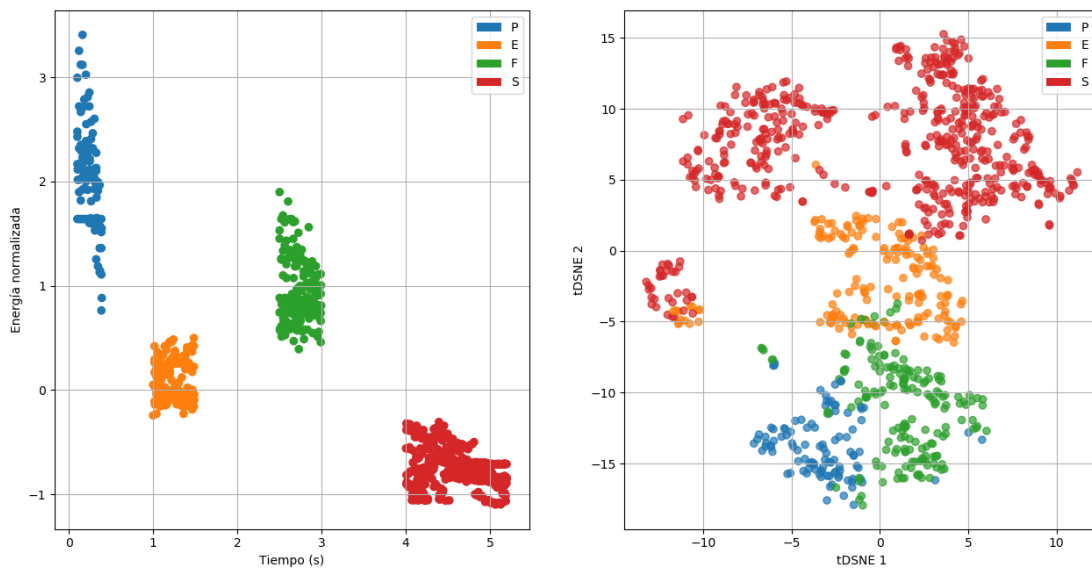
**Figura 64.** Separación de las etapas para HN utilizando SNE.



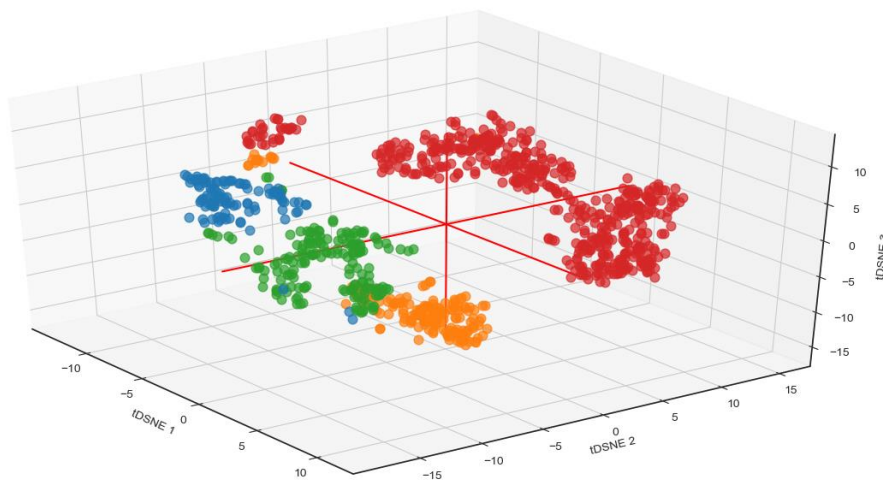
**Figura 65.** Separación de las etapas para HN utilizando SNE.

Haciendo nuevamente un recorte de los tramos temporales de las etapas, se analizó si la transición generaba puntos espurios que no permitan diferenciar las etapas de manera clara al algoritmo. Se efectuó el mismo recorte que el utilizado en la Sección 6.2.1 para el PCA. En las Figuras 66 y 67 se observa cómo mejora el agrupamiento de cada una de las etapas utilizadas en dos y tres variables, respectivamente. En el análisis en dos dimensiones, se puede observar el orden de los *clusters*. Las dos etapas donde se

produce efectivamente el mecanizado son contiguas (etapa P y F), a la vez que las etapas donde no se produce ningún mecanizado (E y S).

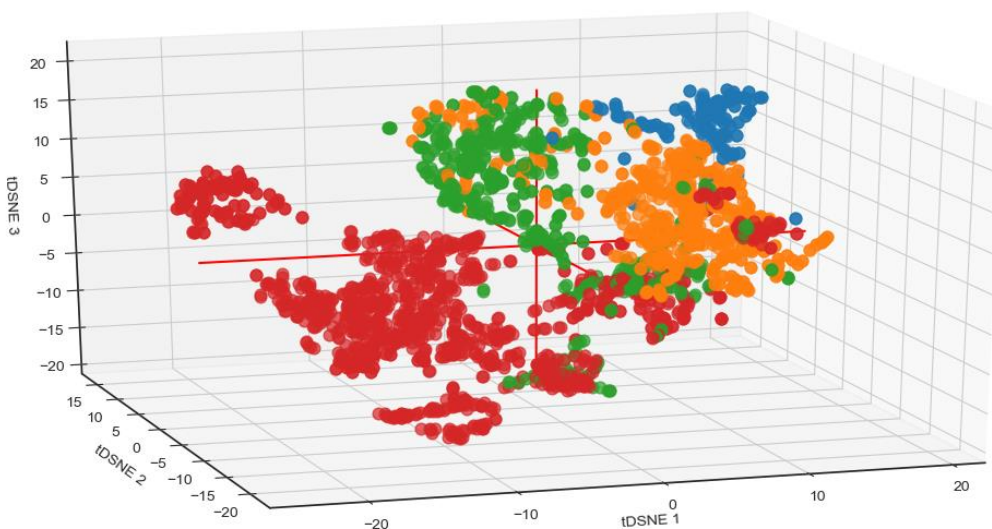


**Figura 66.** Utilización de las etapas recortadas para HN utilizando SNE. a. Energía vs tiempo. b. tDSNE2 vs tDSNE1.



**Figura 67.** Gráfico para el caso HN con etapas recortadas utilizando SNE con 3 variables.

Luego, se analizó el caso de la fresa HU con SNE y tal como lo muestra la Figura 68 se comprobó que, a diferencia de los PC, el algoritmo permite distinguir las etapas, aunque la herramienta se encuentre desgastada. Nuevamente se puede ver la misma relación entre los diferentes *clusters*. La etapa P es contigua a la F y la E a la S.



**Figura 68.** Utilización de las etapas recortadas para HU utilizando SNE con 3 variables.

Esto muestra que, en la clasificación de etapas de mecanizado, el SNE resultó ser una herramienta efectiva.

### 6.2.3. Mapas auto-organizados para la clasificación de etapas

Se desarrolló un algoritmo que permite obtener el mapa auto-organizado de Kohonen<sup>1</sup>, desarrollado en el lenguaje de programación Python, el cual se adapta a comportamientos no lineales de las señales y permite constatar de manera gráfica qué características en común tiene cada uno de los hits de EA provenientes de cada una de las etapas de mecanizado. Para acondicionar los parámetros, se realizó el mismo procesamiento que al utilizar los PC y los SNE. Nuevamente se utilizaron todos los parámetros de EA que provee el adquisidor (por lo que cada fila tiene 15 columnas, correspondiente a las variables).

Como se mencionó en la Sección 4.3.1 la cantidad de parámetros de la arquitectura del SOM que se pueden variar es muy amplia. En este caso se realizaron diferentes combinaciones buscando el mapa que mejor permita diferenciar las distintas etapas involucradas en el proceso de corte del panel. En la Figura 69 se presenta uno de los mapas de Kohonen obtenidos para el caso HN. A continuación se detallan los parámetros utilizados para la realización del mismo:

---

<sup>1</sup> Este desarrollo no hubiera sido posible sin el código facilitado por el Dr. Jorge Magallanes de la gerencia de Química de la CNEA.

- **Tamaño de la red (C x R):** 30 x 30
- **Geometría de la red:** Planar
- **Función topológica de corrección de la vecindad:** Triangular
- **Vecino más cercano:** 10
- **Corrección de pesos máxima y mínima:** 0,9 y 0,1
- **Tipo de neurona ganadora:** Salida más grande
- **Número de épocas:** 500
- **Máximo valor absoluto W:** 0,9
- **Actualización de los pesos:** Por época

Como se puede observar, el agrupamiento de cada etapa tiene cierto grado de error pero hay zonas donde es claro que predomina una. El *cluster* de agujereado es vecino del de la etapa de fresado, siendo estas dos las etapas donde efectivamente se mecaniza el material. Luego, la etapa de salida es colindante con la estacionaria y con la de fresado. Al igual que en los PC y SNE, el SOM reconoce que hay algún parámetro o fenómeno que es común a la salida, el fresado y la etapa estacionaria (fenómenos “*in plane*”).

Una de las fuentes de error puede ser la incapacidad de discriminar de manera exacta en qué intervalo temporal se sitúa cada una de las etapas, teniendo pesos finales espurios en el mapa de Kohonen.

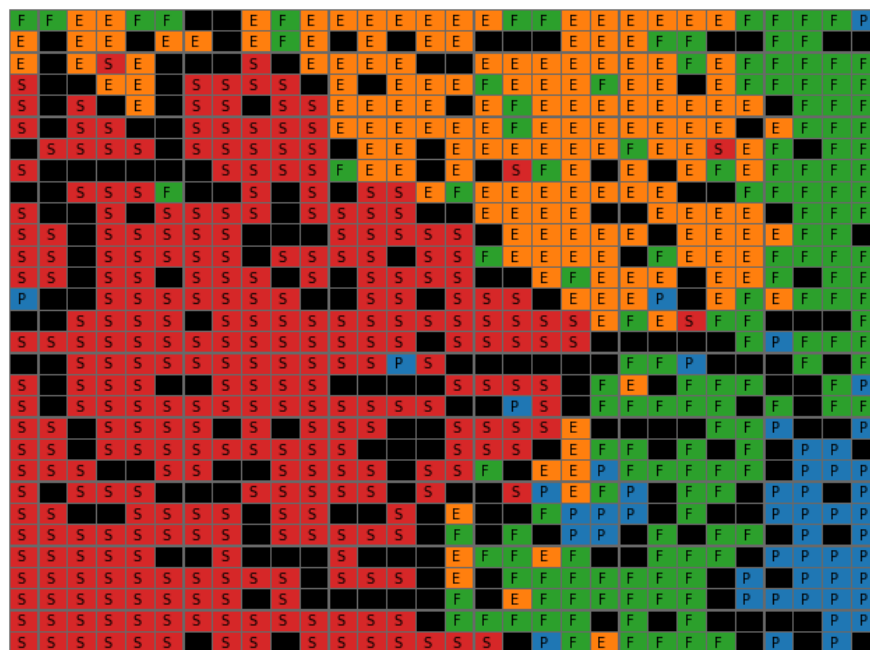
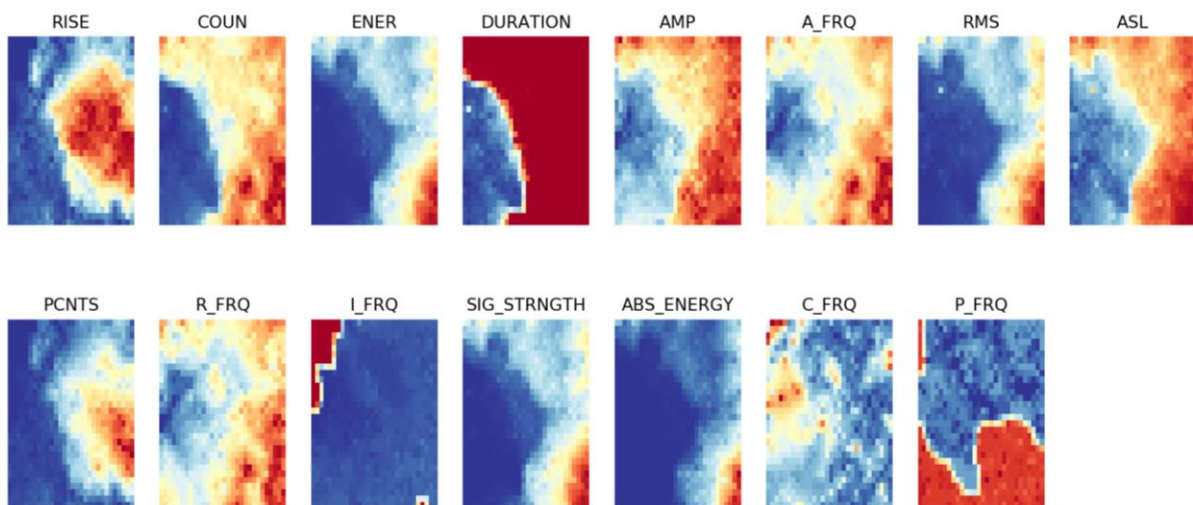


Figura 69. Mapa de entrenamiento para las etapas de HN.

Una herramienta muy útil es la representación de los pesos de cada variable sobre el SOM, obteniendo gráficos de contorno para cada variable. El mapa superior visto en la Figura anterior, es la superposición de todos estos pesos que ubica a cada entrada en una neurona. Estos gráficos permiten analizar la injerencia de las variables. En la Figura 70 se exhiben los mapas de contorno para cada una de las variables. El parámetro Duración, por ejemplo, no será de gran utilidad ya que su contorno abarca gran parte del mapa y puede ser eliminada a la hora de realizar el análisis con el SOM. En cambio, la Energía Absoluta ocupa un área más restringida, lo cual implica que aporta mayor información que permite al algoritmo discriminar las etapas.

Otro factor a tener en cuenta son las variables que tienen un mapa similar, como es el caso de Amplitud y ASL, lo cual implica que aportan información similar al mapa superior, por lo que utilizar ambas es redundante y alguna de estas dos variables puede ser eliminada sin que haya modificaciones sustanciales en el resultado final.



**Figura 70.** Mapa de Kohonen de cada una de las variables.

Se efectuó la predicción de la red con distintas matrices de datos a partir los mapas obtenidos previamente. Para cada una de las etapas se utilizaron 100 muestras distintas. Este tipo de análisis es más veloz que el entrenamiento de la red ya que se evalúa qué peso asociado a una neurona ya calculada tiene mayor similitud con el vector de entrada y luego la neurona ganadora se marca en el mapa. Nuevamente, se eligió el conjunto de datos de predicción con un menor error de norma. Es importante destacar que para corroborar que la red predice correctamente, es necesario ingresar los datos en un orden aleatorio.

En la Figura 71 se muestra el mapa de predicción. Para poder conocer el grado de falla del entrenamiento, se graficaron con sus colores correspondientes las neuronas en las que se predijeron correctamente y en color blanco donde el valor predicho difiere al de entrenamiento. Se contabilizó la cantidad de veces que una neurona ganadora en la predicción era incorrecta dando como resultado 6 fallas de 31 neuronas predichas por la red (6/31), lo cual implica que la predicción funciona con un error de aproximadamente el 18%.

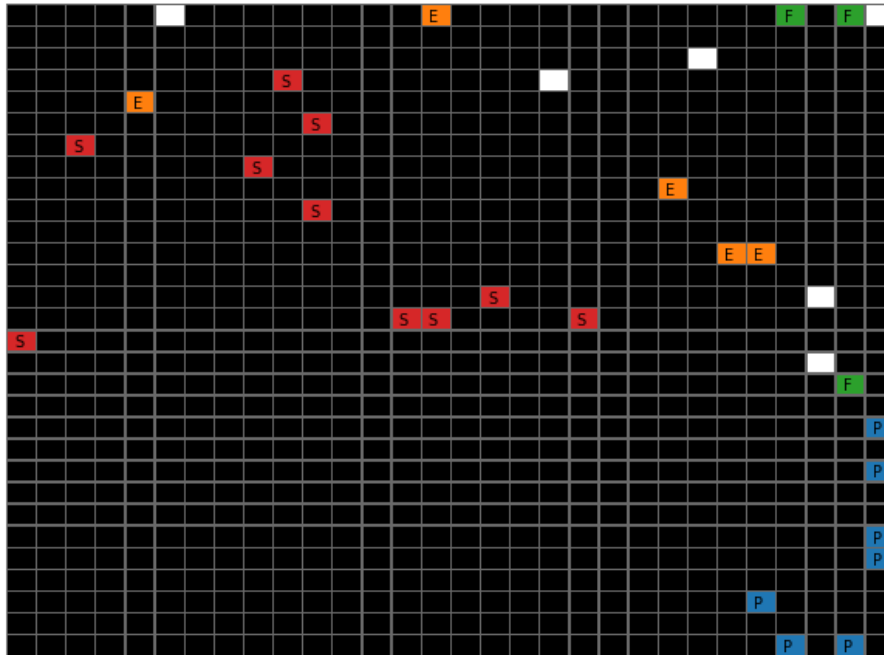


Figura 71. Mapa de simulación con submatrices de 100 muestras para HN.

En el caso de HU el comportamiento de las redes neuronales fue muy similar pero con una mayor mezcla entre los *clusters* y se debió utilizar un mapa más grande. En la Figura 72 se muestra el mapa de entrenamiento de la red. Los parámetros utilizados para la realización del mismo son:

- **Tamaño de la red (C x R):** 40 x 40
- **Geometría de la red:** Planar
- **Función topológica de corrección de la vecindad:** Triangular
- **Vecino más cercano:** 20
- **Corrección de pesos máxima y mínima:** 0,9 y 0,1
- **Tipo de neurona ganadora:** Salida más grande
- **Número de épocas:** 400

- Máximo valor absoluto W: 0,9
- Actualización de los pesos: Por época

En este mapa de entrenamiento se puede ver cómo hay zonas de mezcla que confunden la etapa de P con la F y *clusters* de la etapa P que no están en zonas de la zona F.

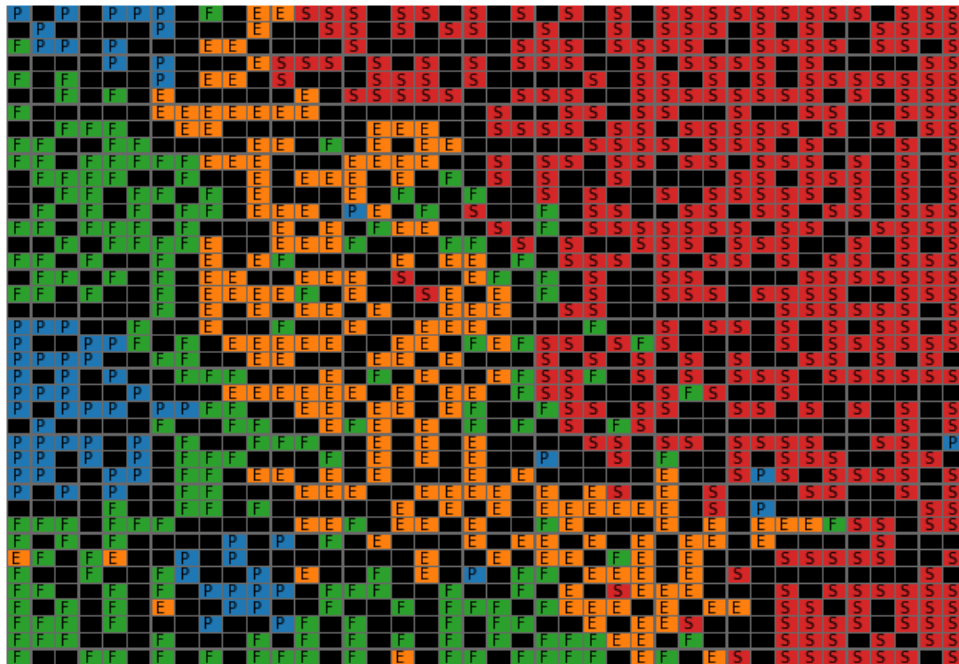
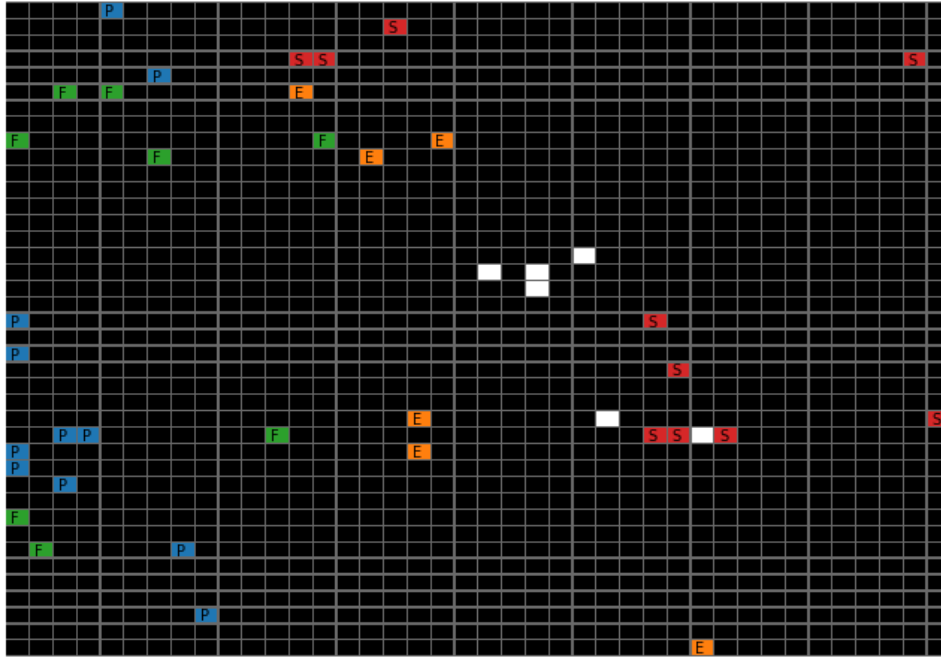


Figura 72. Mapa de entrenamiento para las etapas de HU.

Se efectuó el mapa de predicción y se contrastó con el mapa de entrenamiento como se observa en la Figura 73. La cantidad de desaciertos fue de 6/41, por lo que el error fue de aproximadamente el 14%.



**Figura 73.** Mapa de simulación con submatrices de 70 muestras para HU.

Los mapas de Kohonen realizados permiten visualizar zonas donde predomina alguna de las etapas y zonas difusas. El agrupamiento para la herramienta desgastada es menos claro que para la herramienta nueva al igual que sucede en los PC.

Estos errores pueden deberse a un error en la toma de datos durante las mediciones, el carácter de los mismos, o la incorrecta selección de los parámetros de la arquitectura de la red, ya que la dificultad de esta herramienta radica en la cantidad de variables que se deben modificar para lograr un óptimo funcionamiento. Es por este motivo que sería conveniente desarrollar un algoritmo que encuentre la solución óptima de la red variando de manera automática las distintas variables que intervienen.

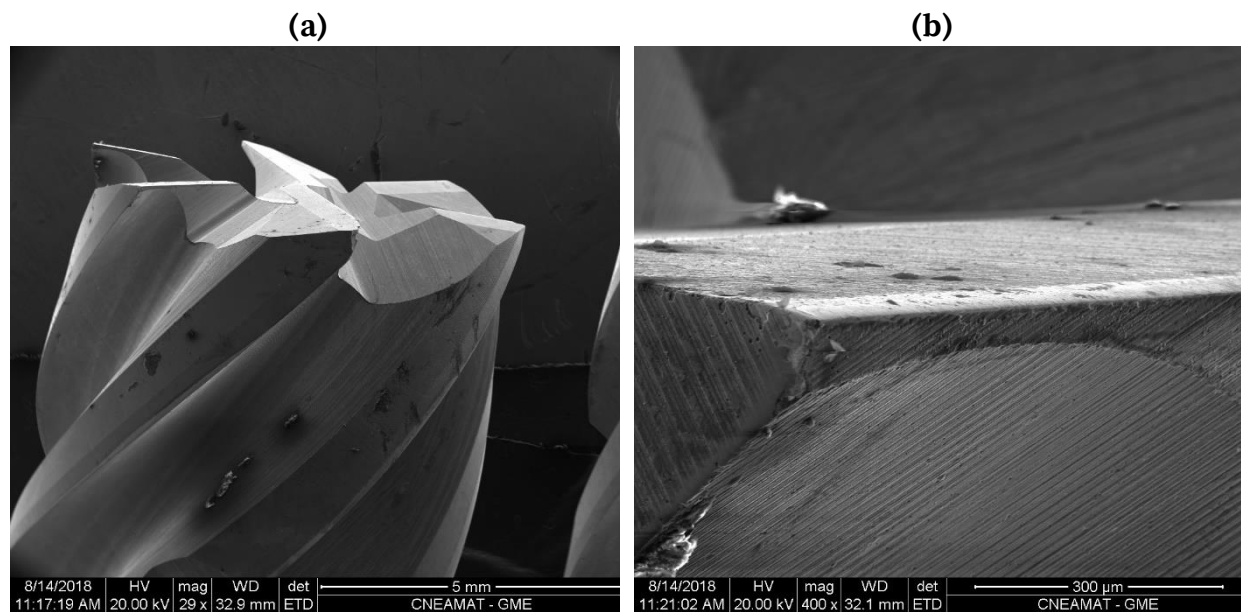
La predicción de cada una de las etapas funcionó con un error de entre 15% y 18%.

## Capítulo 7: Caracterización de distintos grados de desgaste de la herramienta

En esta etapa, se buscó reconocer el desgaste de las herramientas utilizadas para el mecanizado del panel tipo sándwich, a partir del procesamiento de los parámetros de EA, utilizando, como en la sección anterior, distintos algoritmos de aprendizaje de máquina (PC, SNE y Redes Neuronales).

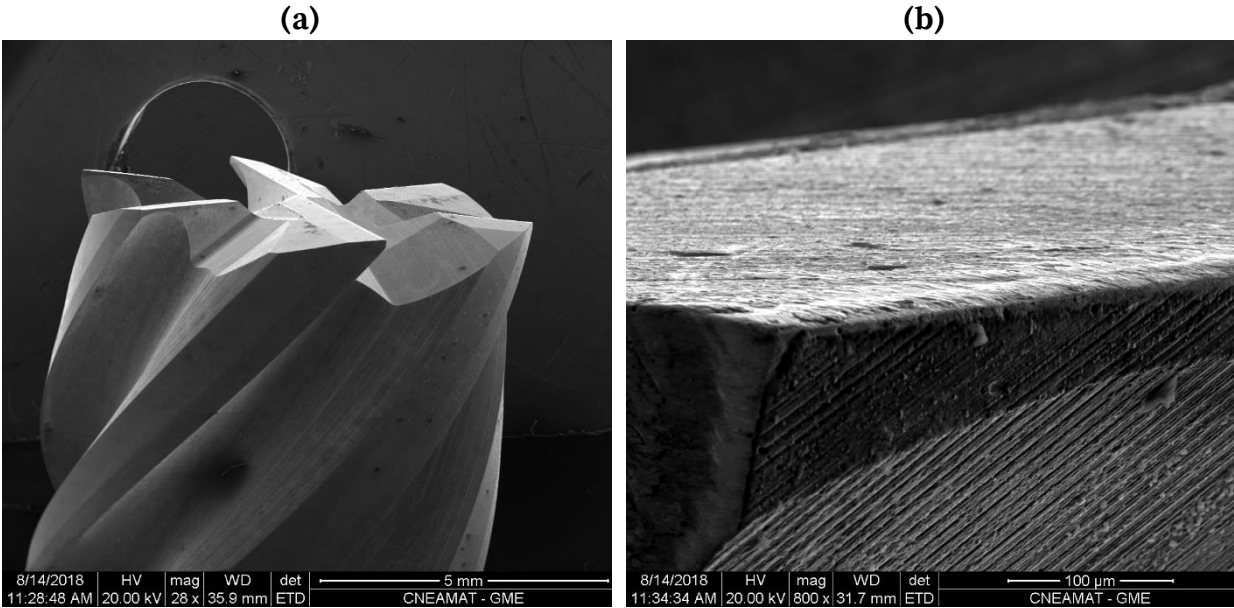
### 7.1. Método Experimental

Nuevamente se realizó el mecanizado sobre probetas de un panel con estructura tipo sándwich. Se seleccionaron tres herramientas marca Sandvik (descriptas en el capítulo anterior) con diferentes grados de desgastes. Para realizar la elección se inspeccionaron mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) con el objetivo de clasificar cualitativamente el desgaste de cada una. Se seleccionó una herramienta con mucho uso que representa el estado “desgastada” (H1) como se puede observar en las imágenes obtenidas mediante el SEM (Figura 74).



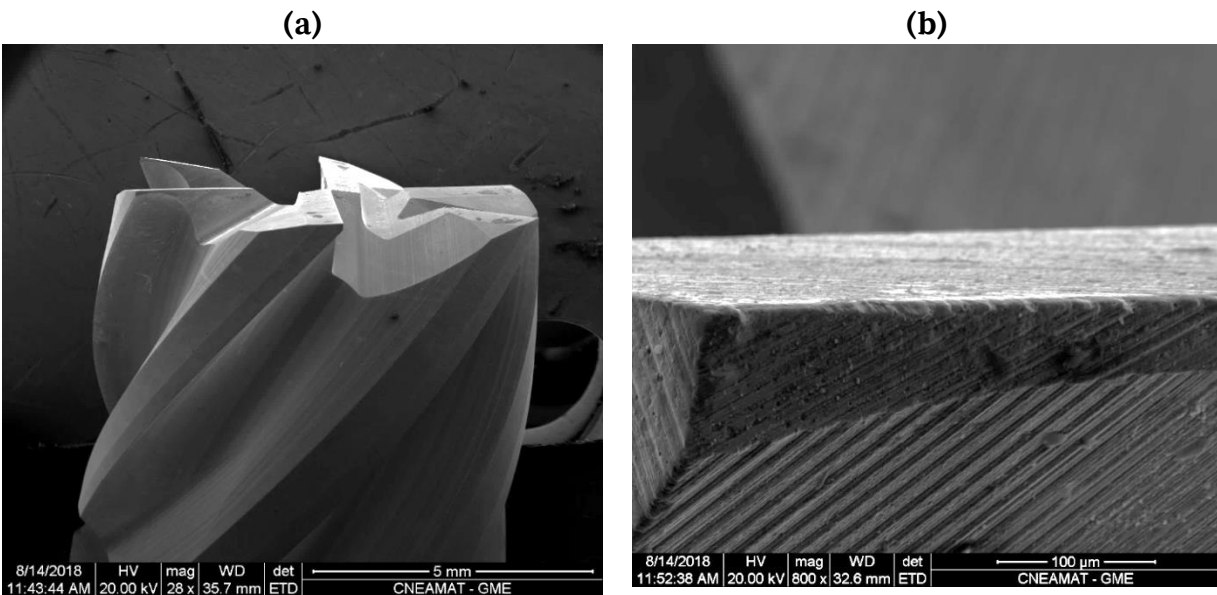
**Figura 74.** Medición con MEB de H1. (a) imagen de la punta de la broca, (b) detalle de uno de sus filos.

Se eligió otra herramienta con un “desgaste intermedio” (H2) exhibida en la Figura 75. Como se puede observar, esta herramienta posee un desgaste de filo menor que H1, menos redondeado y más irregular.



**Figura 75.** Medición con MEB de H2. (a) imagen de la punta de la broca, (b) detalle de uno de sus filos.

Por último se seleccionó una sin uso. En la Figura 76 se puede observar una herramienta nueva con mínimo desgaste y sin ningún defecto macroscópico (**H3**). Si se comparan las 3 herramientas, se comprueba que la que tiene mayor desgaste tiene un filo menos anguloso y las superficies del mismo más lisas y redondeadas. Esto puede deberse a la interacción entre la herramienta y la viruta de CFRP.

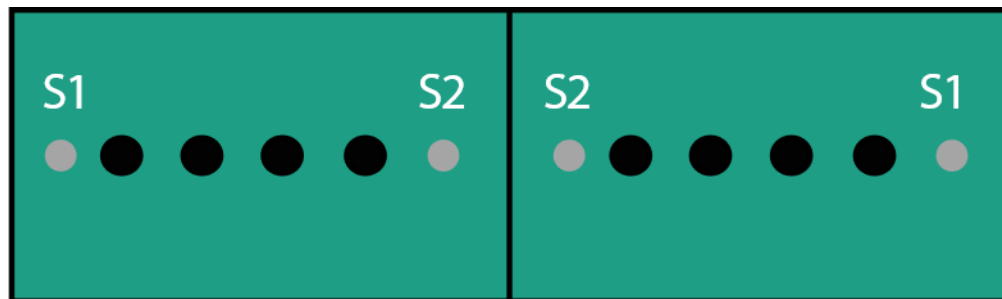


**Figura 76.** Medición con MEB de H3. (a) imagen de la punta de la broca, (b) detalle de uno de sus filos.

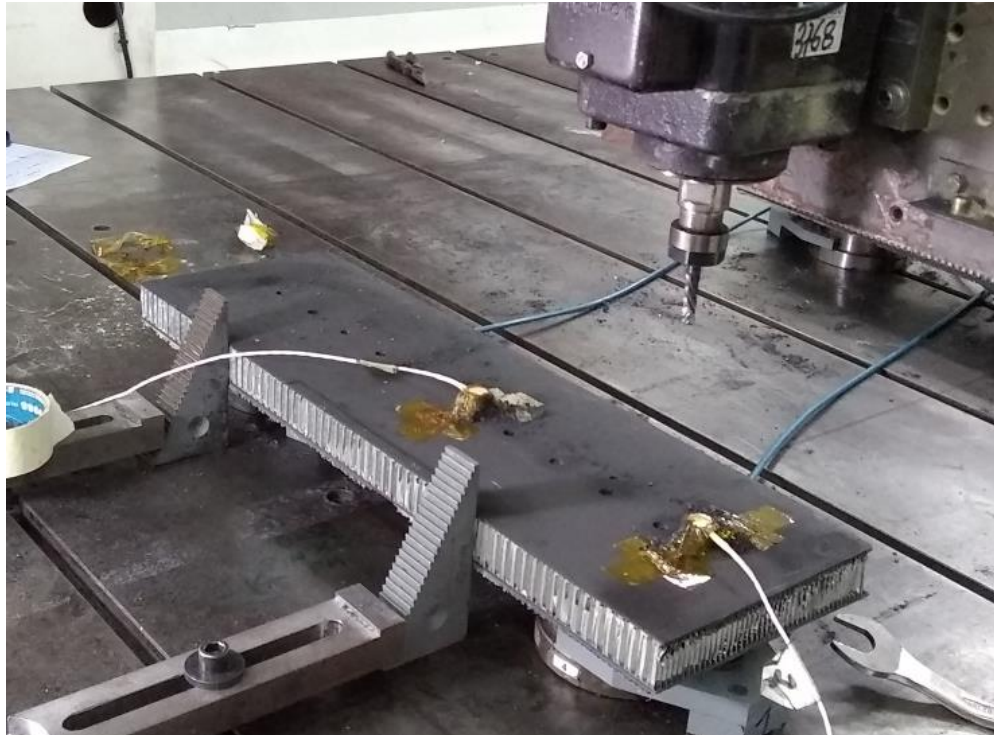
En la Tabla 2 se resumen las fresas utilizadas a lo largo de este capítulo:

| <b>Nomenclatura</b> | <b>Estado de la fresa</b> |
|---------------------|---------------------------|
| H1                  | Muy usada                 |
| H2                  | Usada                     |
| H3                  | Nueva                     |

Luego de caracterizar las herramientas se confeccionaron 2 probetas del mismo material descrito en el capítulo anterior, pero en esta medición las dimensiones fueron de 620 mm de largo y 180 mm de ancho. Sobre cada una de las probetas se efectuaron 8 agujeros. En la probeta 1 se realizó el mecanizado con las fresas H1 y H3 y en la probeta 2 con las H2 y H3. Se utilizó la misma maquina CNC, la misma velocidad de avance (250 mm/min) y de rotación (8000 RPM) y la misma estrategia de mecanizado. Los sensores se colocaron a 50 mm del borde pero debido al largo de la probeta, los agujeros se tuvieron que realizar con una distancia entre centros de 50 mm. En la Figura 77 se muestra un croquis de la probeta y los sensores y la Figura 78 muestra el proceso de medición, donde se puede ver la disposición de los sensores. El sistema de sujeción y acoplamiento también es el mismo.



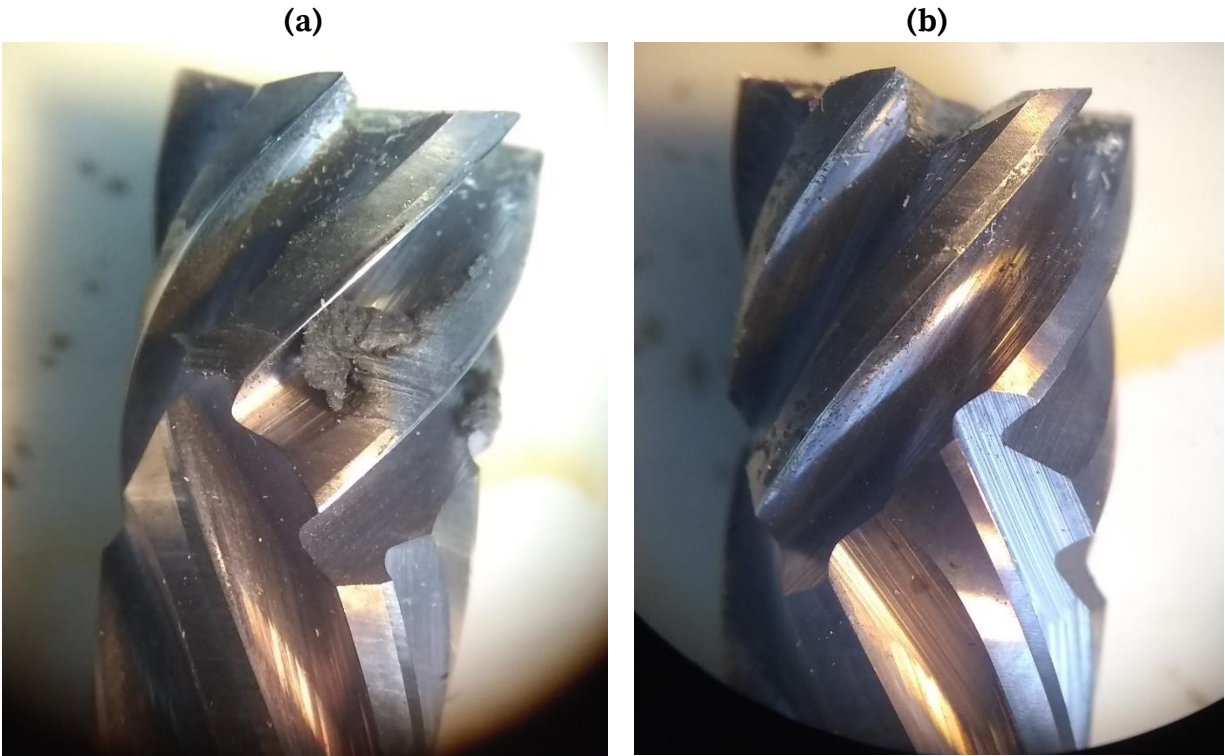
**Figura 77.** Disposición de los agujeros y sensores sobre las probetas.



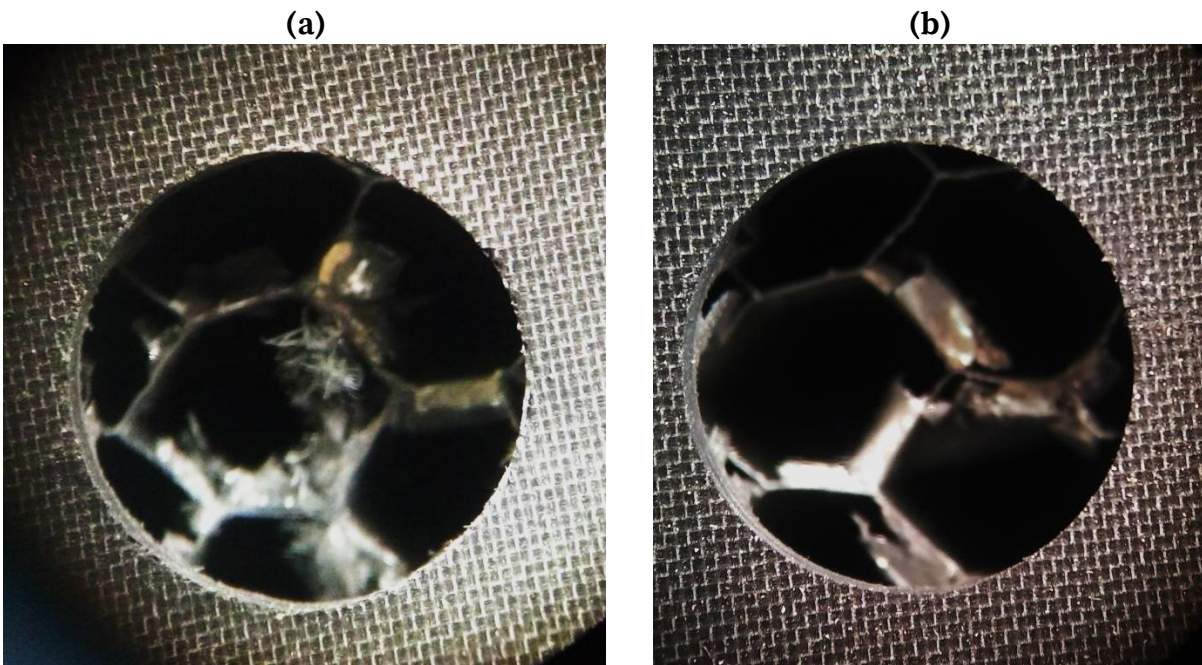
**Figura 78.** Medición durante el proceso de agujereado.

## **7.2. Resultados y Discusión**

Con una inspección bajo lupa se observó que a medida que la herramienta se desgasta, acumula mayor cantidad de viruta (fibra de carbono + matriz) en sus filos. En la Figura 79a se muestra el detalle de la acumulación de viruta de H1 y en la Figura 79b de H3, el cual es significativamente menor. Este efecto se debe a que, al estar la herramienta más desgastada, el proceso genera más calor y esto a su vez produce que la matriz aumente su temperatura, sobrepase el punto de transición vítrea y se pegue a la herramienta. Según [Ramirez, 2014], para el caso del agujereado de muestras de CFRP unidireccional de 30 mm de espesor, la temperatura en el extremo del filo de la herramienta (de características similares a la de este trabajo) es cercana a 450 C. Allí, aunque el tipo de probeta difiere en su espesor, el autor afirma que la herramienta llega velozmente a altas temperaturas y que este fenómeno se hace más pronunciado a medida que la herramienta se desgasta.



**Figura 79.** (a) H1 y (b) H3 luego de realizar el mecanizado de los paneles.



**Figura 80.** Agujero realizado con H1 (a) y agujero realizado con H3.

La resina que se utiliza para la elaboración del CFRP estudiado en este trabajo tiene una temperatura de transición vítrea  $T_g$  de 258 C luego del curado. Esto implicaría que en el mecanizado, la fibra se rompe de manera frágil, mientras que la resina se extrae de

manera dúctil. A medida que la herramienta se va desgastando, su temperatura se incrementa durante el mecanizado, generando el efecto que se observa la Figura 79a, empobreciendo la calidad de los agujeros efectuados como se puede ver en la Figura 80a. Los agujeros producidos con la herramienta más desgastada (H1) (Figura 80a) tienen bordes más imprecisos que los producidos con la herramienta nueva (H3) (Figura 80b) como es de esperarse. El mecanismo descrito afectará de manera directa la EA que se produzca a partir del mecanizado, generando diferentes tipos de fuentes de EA según el desgaste de la herramienta.

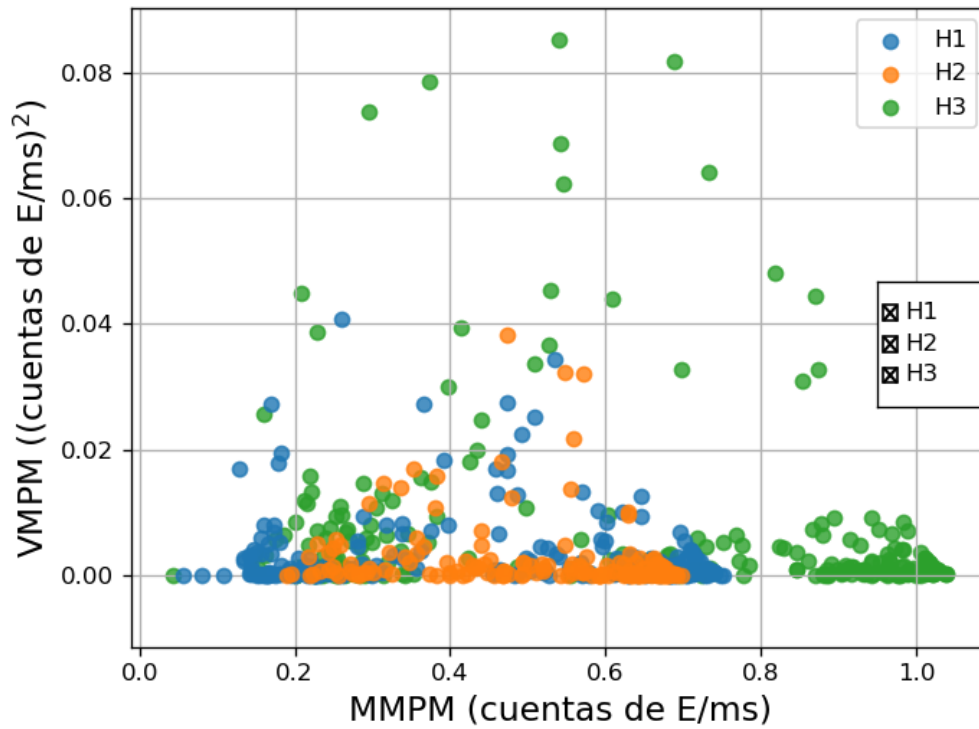
Luego de realizar los 4 mecanizados con cada una de las herramientas se efectuó una inspección mediante lupa y SEM de las herramientas. No se notaron cambios significativos en las mismas.

### **7.2.1. Análisis de la Potencia Media en función del desgaste**

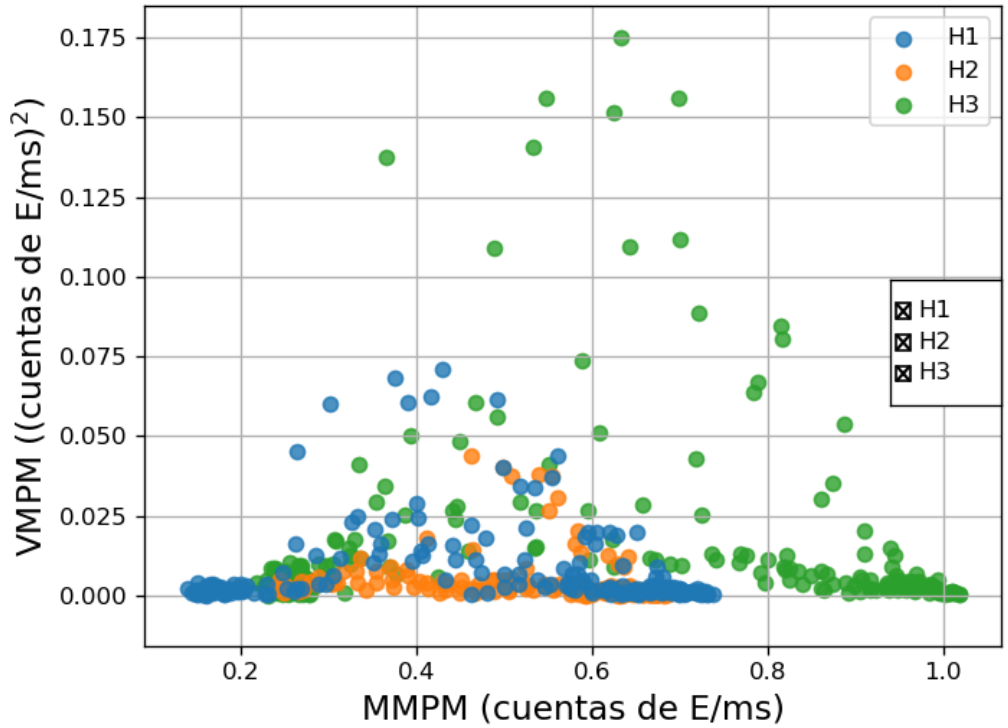
En el trabajo de Gómez y otros se estudió para el taladrado de metales la relación entre la condición de las brocas y la Potencia Media (PM) de la EA. Este parámetro compuesto se define como el cociente entre la energía y la duración de un hit de EA, y tiene la finalidad de independizar el parámetro energía del tamaño de la ventana temporal de medición, ya que durante el corte esta es una señal continua [Gómez, 2012]. Para este trabajo se desarrolló un algoritmo que permite obtener la media móvil de la potencia media (MMPM) y la varianza móvil de la potencia media (VMPPM) a partir de los hits de EA obtenidos debido al maquinado con cada una de las herramientas fijando distintas ventanas móviles. Como se mostró en el Capítulo anterior, la amplitud de las señales de EA varía en cada uno de los agujeros confeccionados en función de la posición relativa del mecanizado y de los sensores (fijos). Es por esto que se normalizaron las señales por separado y luego se las multiplicó por un factor de corrección correspondiente al punto más alto de energía para esa herramienta. Luego se realizó un gráfico de VMPPM vs. MMPM, mostrando cada una de las herramientas utilizadas H1, H2 y H3. Se analizaron las etapas donde efectivamente se está mecanizando el panel, utilizando ventanas de 2, 5, 10 y 25 muestras para el agujereado, de 0 a 0,5 s (Figura 81, 82, 83 y 84, respectivamente) y 5, 10, 40 y 100 muestras para la etapa de fresado, de 1 a 2 s, como se puede observar en las Figura 85, 86, 87 y 88, respectivamente.

En los gráficos para el agujereado, las señales obtenidas no muestran una tendencia clara y definitiva. Cuando la herramienta está menos gastada, tiene un menor valor de MMPM y un mayor valor de VMPPM. En imágenes tomadas con el SEM se observa que a medida que se avanza en el mecanizado de las probetas el recubrimiento se va

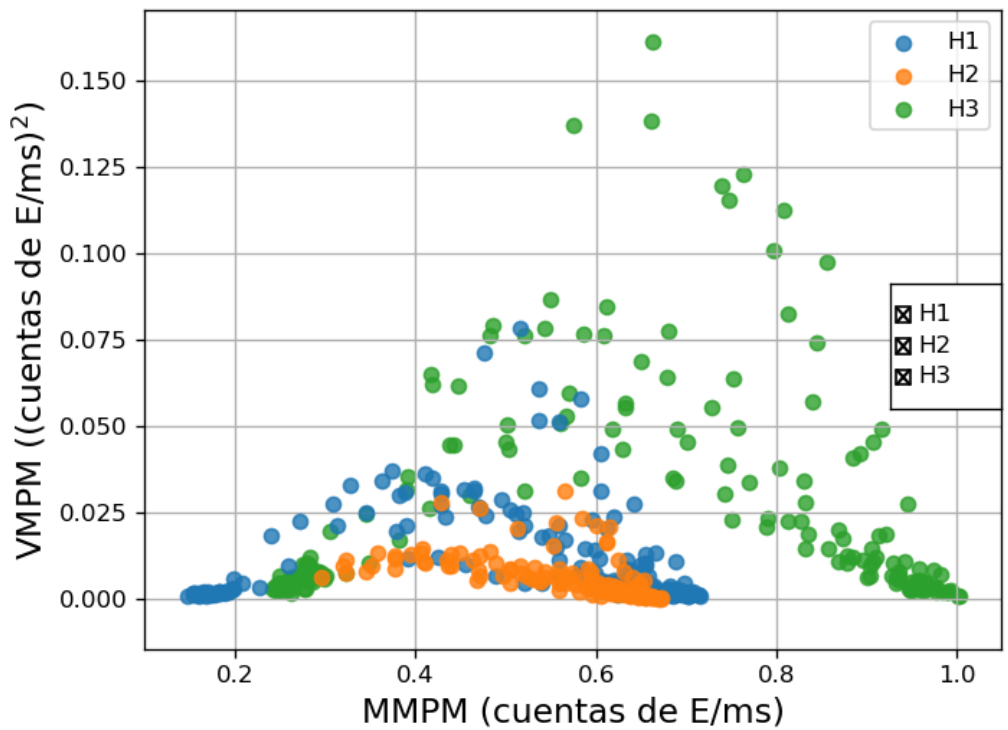
desgastando. Como se observó, cuando la herramienta tiene poco uso se puede notar una irregularidad en su filo. Cuando el desgaste es mayor, se pierde el recubrimiento, pero se redondea y uniformiza el filo de la herramienta. Este podría ser el motivo por el que la varianza de H1 es menor y la de H3 es más pronunciada.



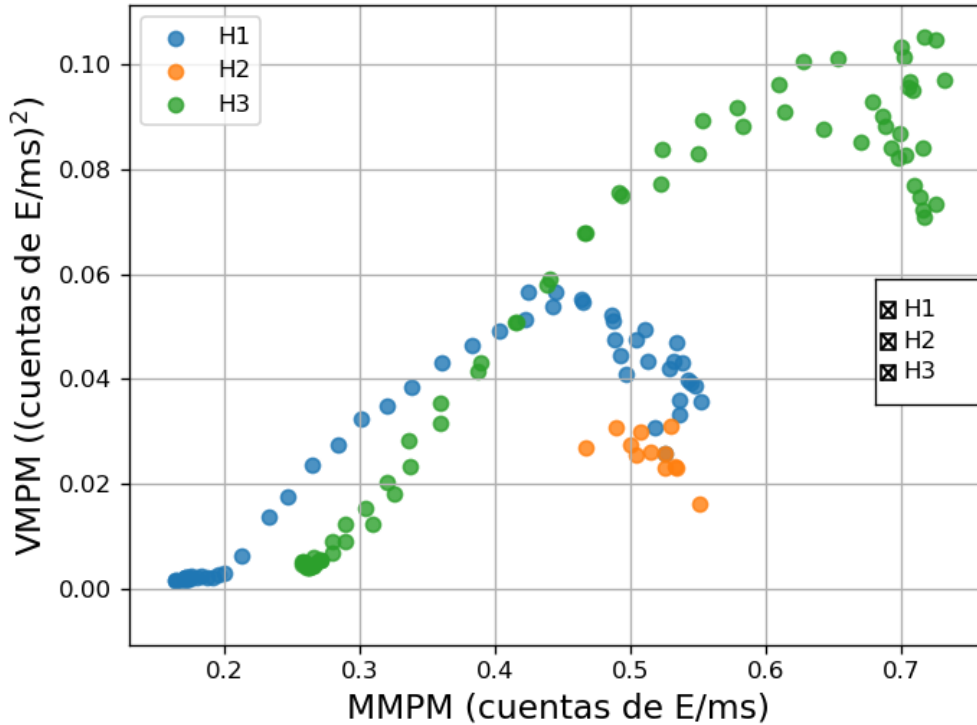
**Figura 81.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de agujereado tomando una ventana de 2 muestras.



**Figura 82.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de agujereado tomando una ventana de 5 muestras.



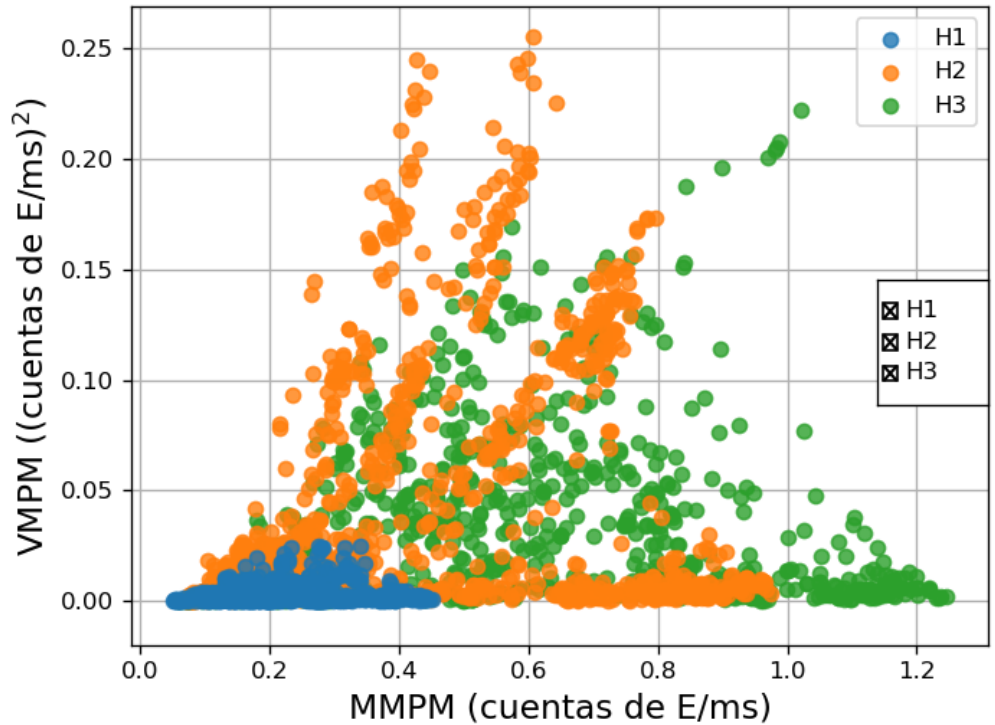
**Figura 83.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de agujereado tomando una ventana de 10 muestras.



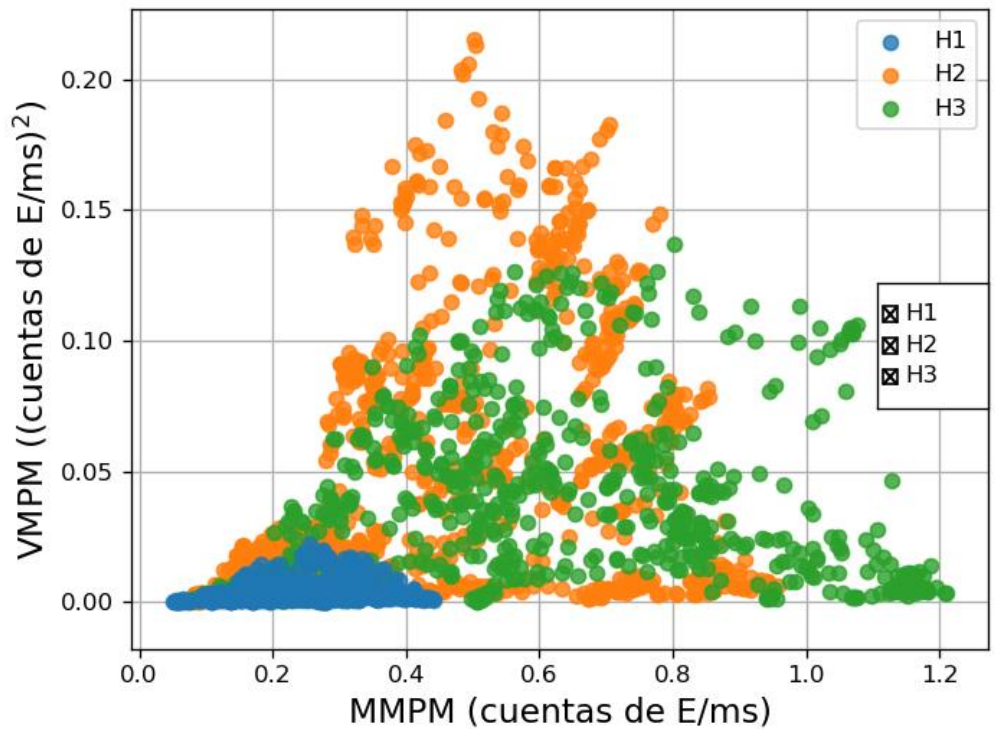
**Figura 84.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de agujereado tomando una ventana de 25 muestras.

En la etapa de fresado se ve una mayor distinción entre las distintas herramientas. La herramienta con mayor desgaste (H1) tiene una MPPM y VMPM menor que las otras dos. Entre H2 y H3 no es clara la diferencia, pero si se aumenta el tamaño de la ventana, se observa cómo hay una mayor cantidad de puntos de mayor MPPM y VMPM para la herramienta con menor desgaste.

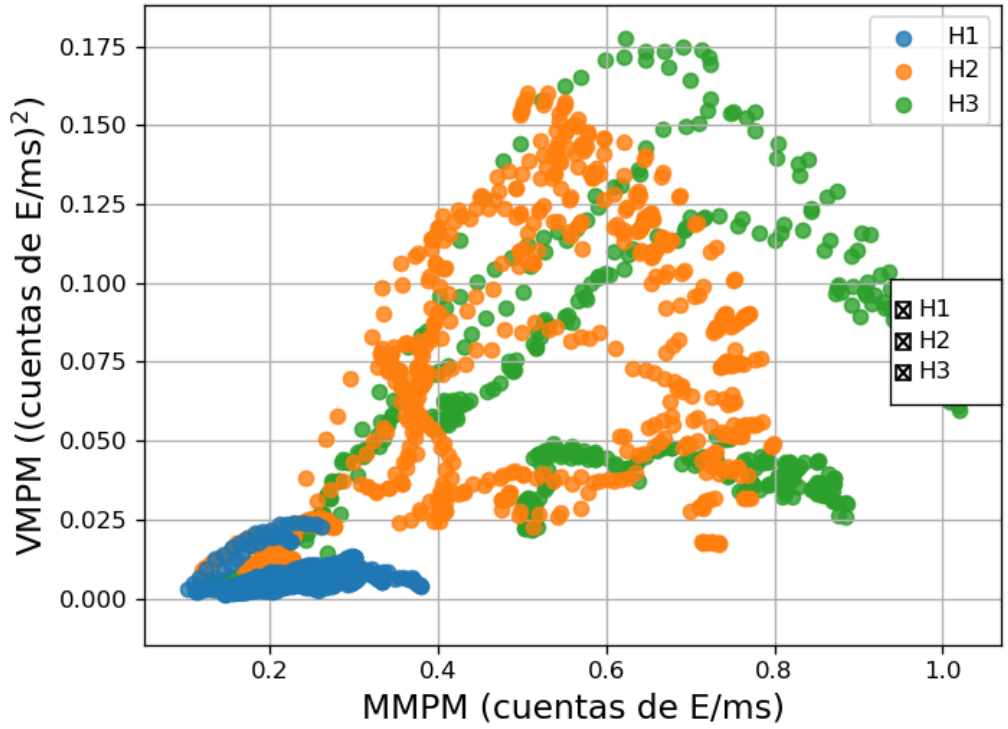
El hecho de que la duración del fresado sea mayor, permite que la señal tenga menos carácter transitorio y sea más propicia para este tipo de análisis, donde es preferible trabajar con señales estacionarias.



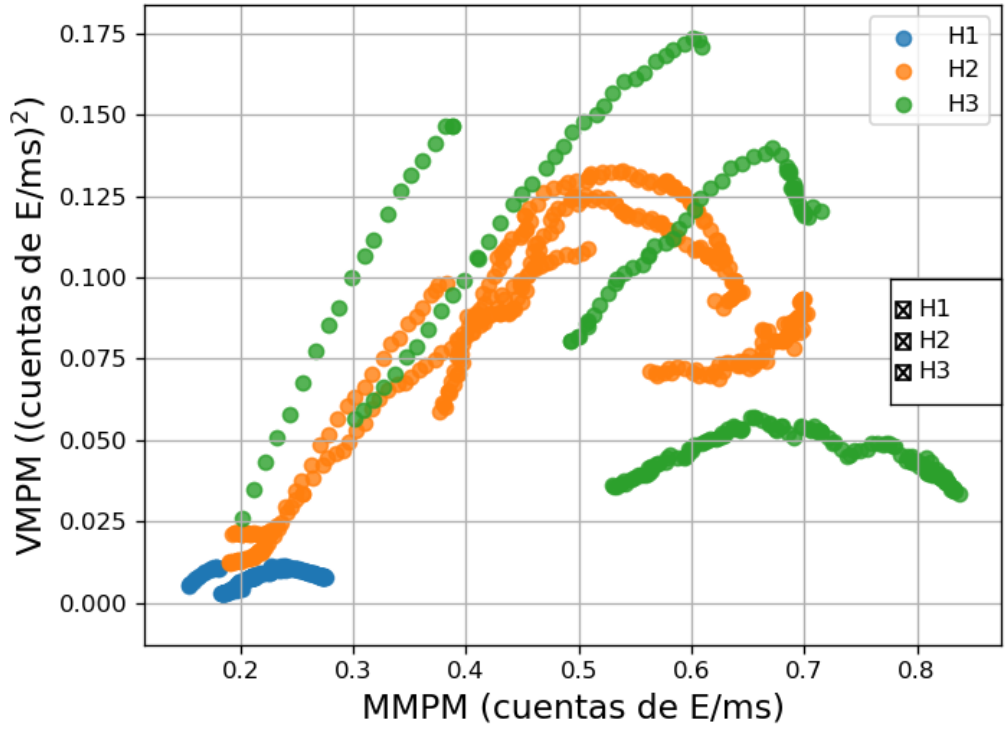
**Figura 85.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de fresado tomando una ventana de 5 muestras.



**Figura 86.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de fresado tomando una ventana de 10 muestras.



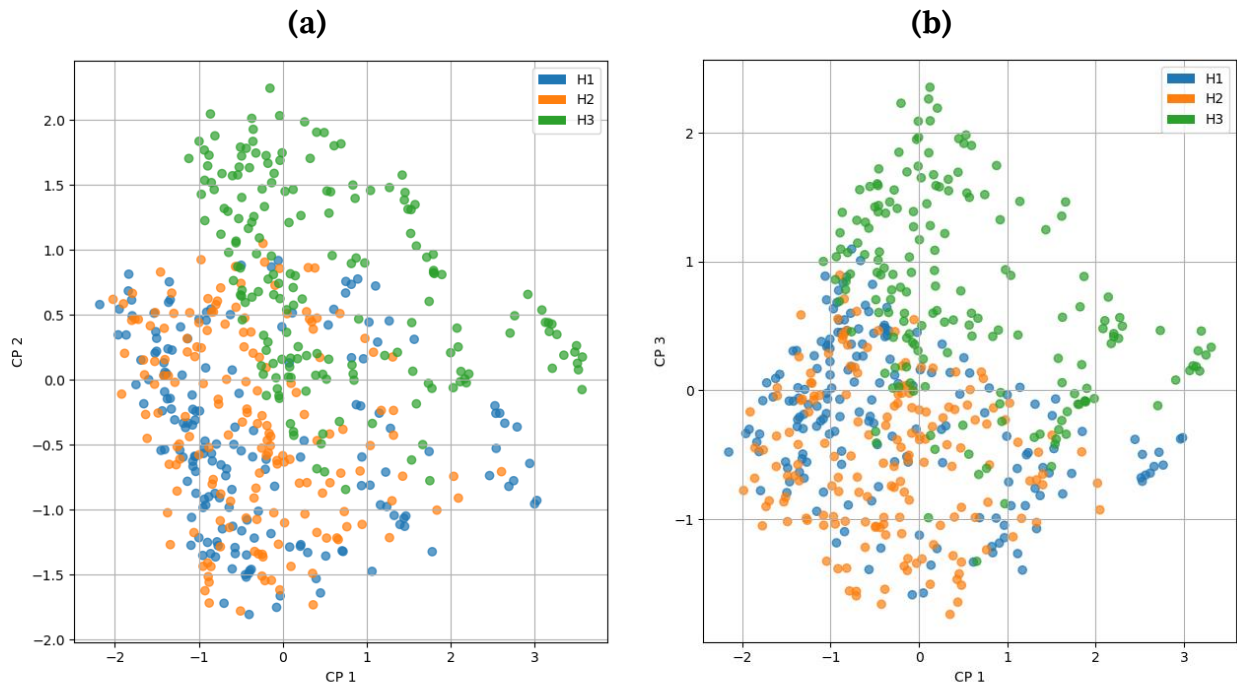
**Figura 87.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de fresado tomando una ventana de 50 muestras.

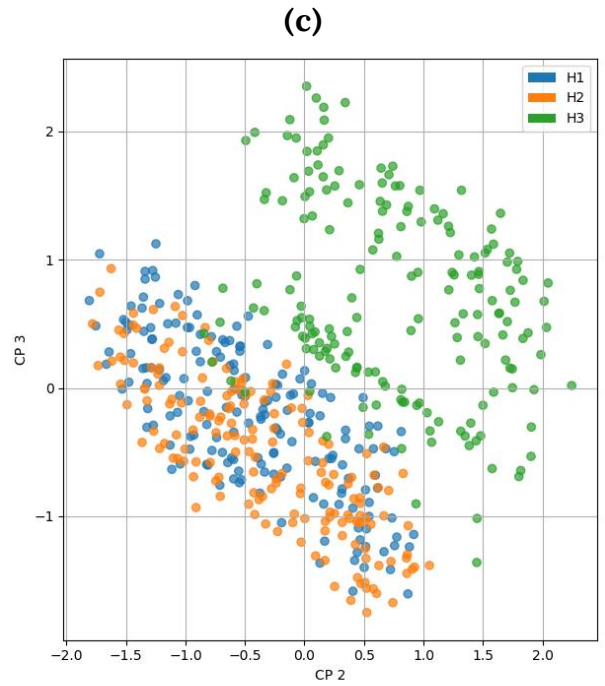


**Figura 88.** Gráfico de media móvil de la potencia media para la etapa de fresado tomando una ventana de 100 muestras.

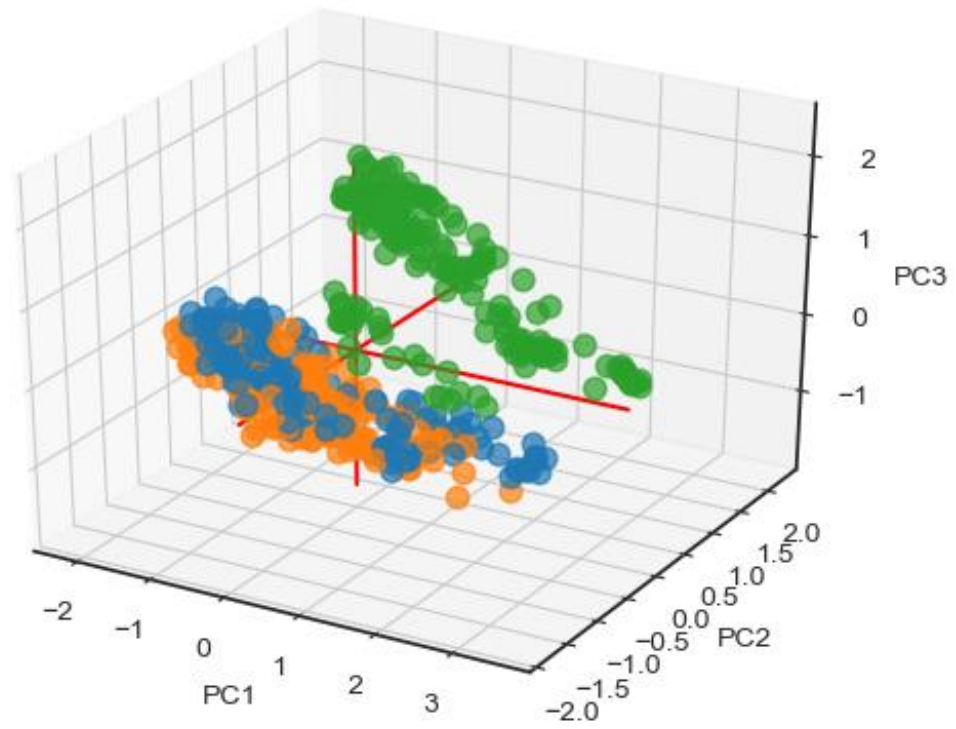
### 7.2.2. Clasificación del desgaste a partir de PC

Igualmente que en la sección 6.2.1 se utilizó el algoritmo de PC, en este caso con el objetivo de discriminar entre las 3 herramientas con diferente desgaste. Para esto se filtraron los datos con una energía menor a 70 aJ y se normalizaron todas las señales individualmente, luego se las agrupó y utilizó el algoritmo de PC. Nuevamente, se analizaron las etapas de agujereado y fresado. En la Figura 89 se presentan los tres primeros PC en todas sus combinaciones para la etapa de agujereado. El algoritmo es capaz de distinguir entre la herramienta nueva y las otras dos, pero H1 y H2 se encuentran totalmente solapadas, como se puede apreciar en el gráfico en 3 dimensiones (Figura 90). El carácter transitorio y no lineal de las señales obtenidas a partir de la EA producida en el agujereado del panel impide que se puedan discriminar los diferentes desgastes de la señal, sin embargo, sí distingue entre la EA producida por una herramienta con muy poco uso y herramientas con un desgaste mayor.



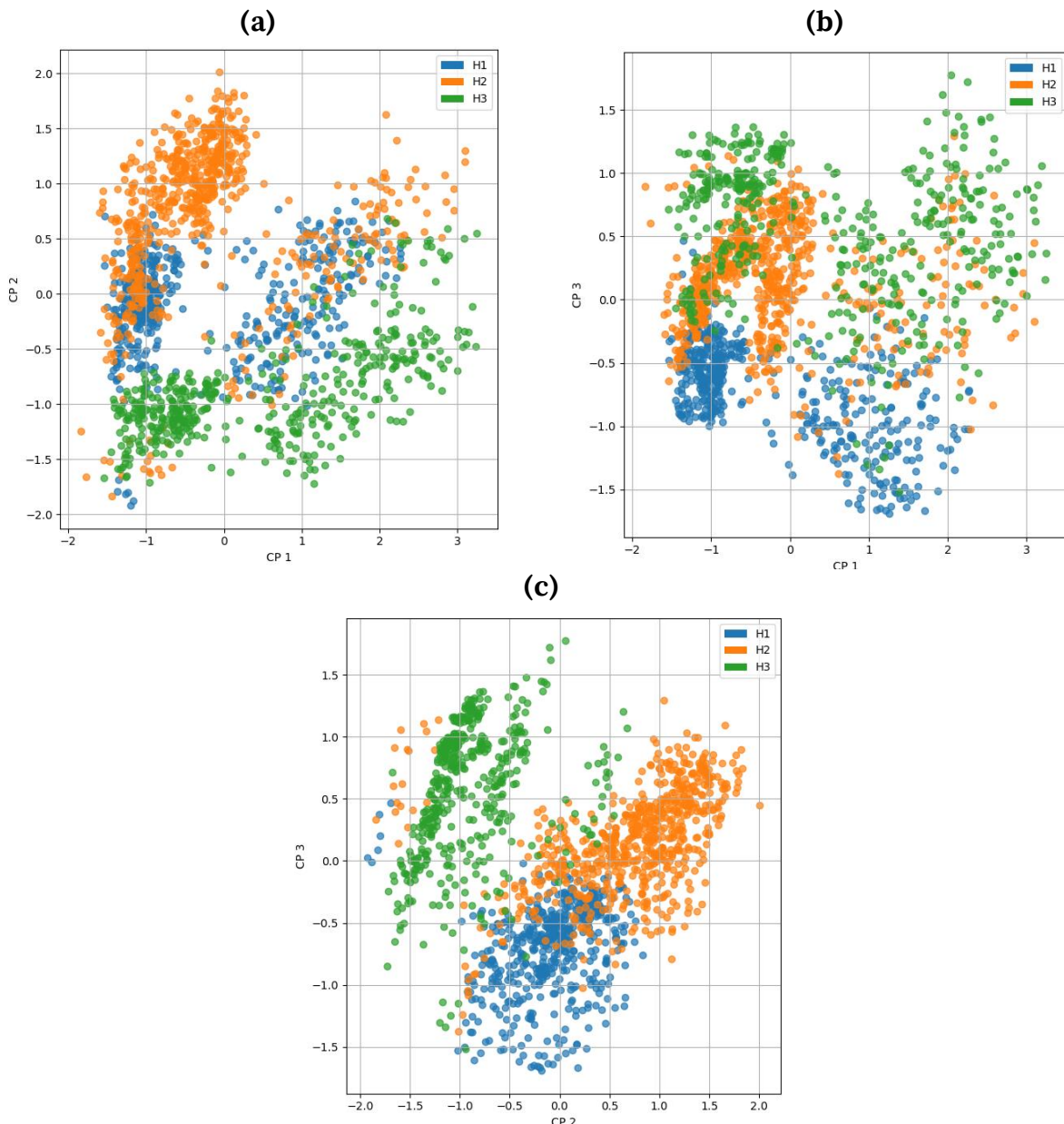


**Figura 89.** (a) PC1 vs PC2, (b) PC2 vs PC3, (c) PC1 vs PC3 para la etapa de agujereado.

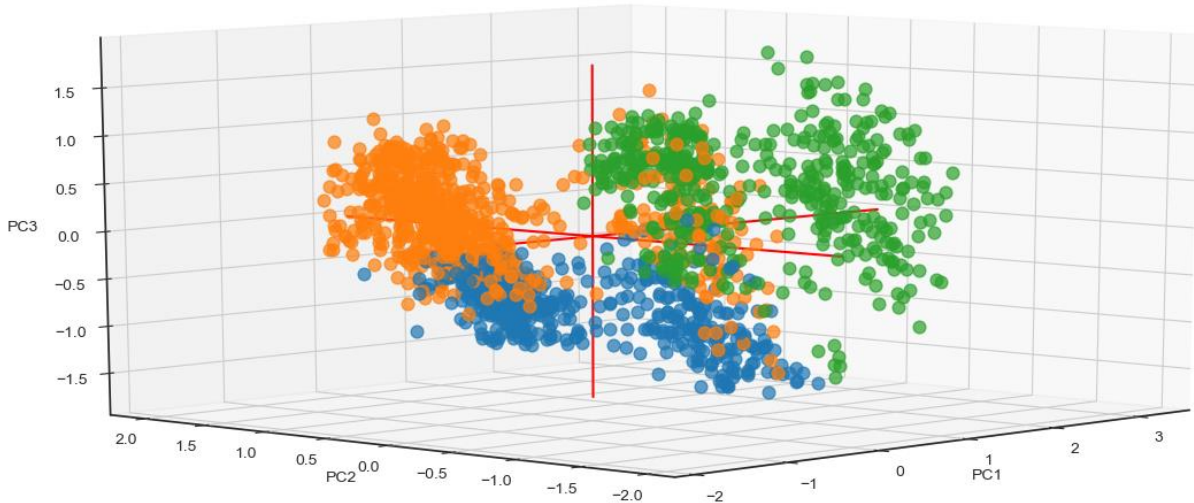


**Figura 90.** Gráfico de PC en 3 dimensiones utilizando PC1, PC2 y PC3 para la etapa de agujereado.

Luego se analizó la etapa de fresado, a partir de la misma normalización utilizada para el agujereado. En las Figura 91 y 92 observa cómo a partir de las señales de EA producidas por el fresado del panel se diferencian las señales pertenecientes a cada herramienta. El algoritmo funciona más eficientemente ya que la señal de fresado es más larga y más estacionaria, permitiendo puntos de mayor similitud que los obtenidos en el agujereado, sin embargo, el carácter no lineal de la EA impide que la clasificación sea más robusta.



**Figura 91.** (a) PC1vsPC2, (b) PC2vsPC3, (c) PC1vsPC3 para la etapa de fresado.

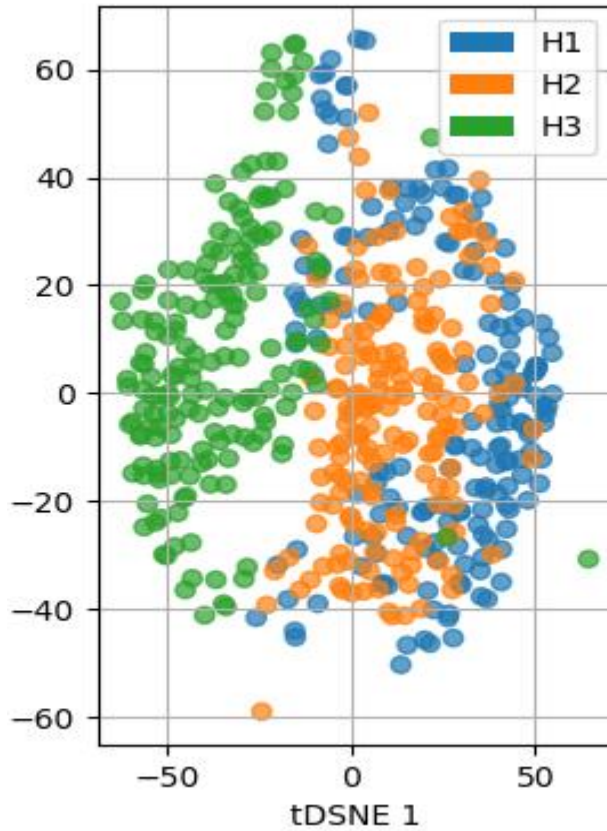


**Figura 92.** Gráfico de PC en 3 dimensiones utilizando PC1, PC2 y PC3 para la etapa de fresado.

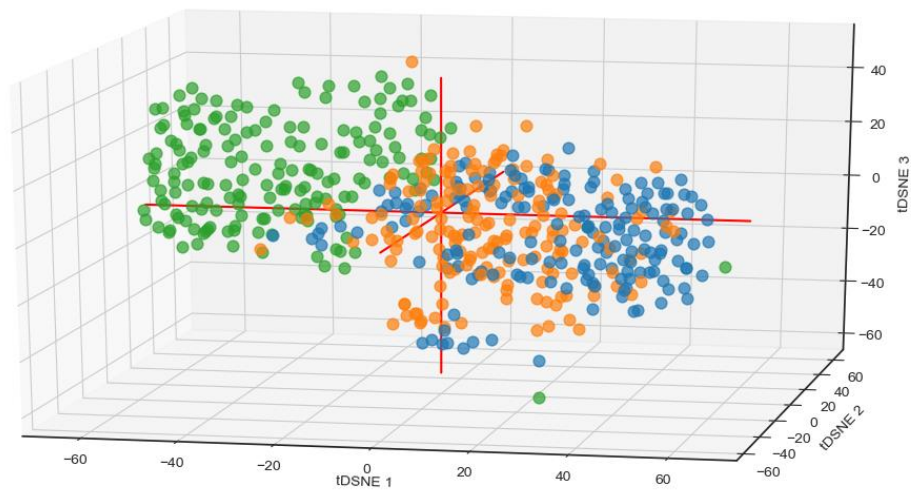
La utilización de PC resultó satisfactoria para diferenciar los diferentes estados de la herramienta en la etapa F, aunque sea una técnica que se utilice para comportamientos lineales.

### 7.2.3. Incrustación estocástica de vecinos para la clasificación del desgaste

Para la aplicación del SNE se utilizó el mismo procedimiento que para los PC, filtrado de energía para filas menores a 70 aJ y normalización de los parámetros provenientes de cada herramienta por separado. En la Figura 93 se muestran las dos primeras variables obtenidas a partir del algoritmo SNE para la etapa de agujereado. Se puede observar las zonas donde predomina cada una de las herramientas. En el caso de H3 se diferencia claramente, H1 y H2 se encuentran levemente mezcladas. En el gráfico tridimensional (Figura 94) se puede observar que el tercer eje no aporta información sustancial. Si se comparan el gráfico de PC y el SNE para la etapa de agujereado, se comprueba que el segundo algoritmo clasifica mejor los desgastes de las herramientas que el primero, aunque tiene cierto grado de mezcla en los diferentes *clusters*.



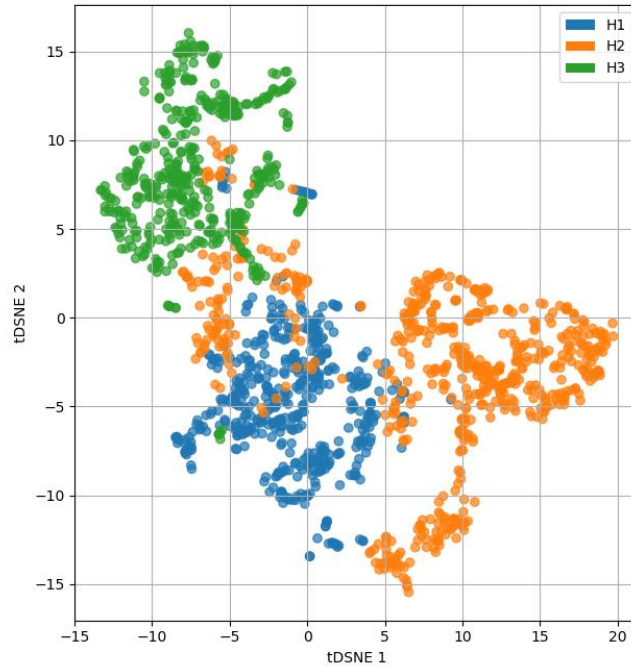
**Figura 93.** SNE en dos variables.



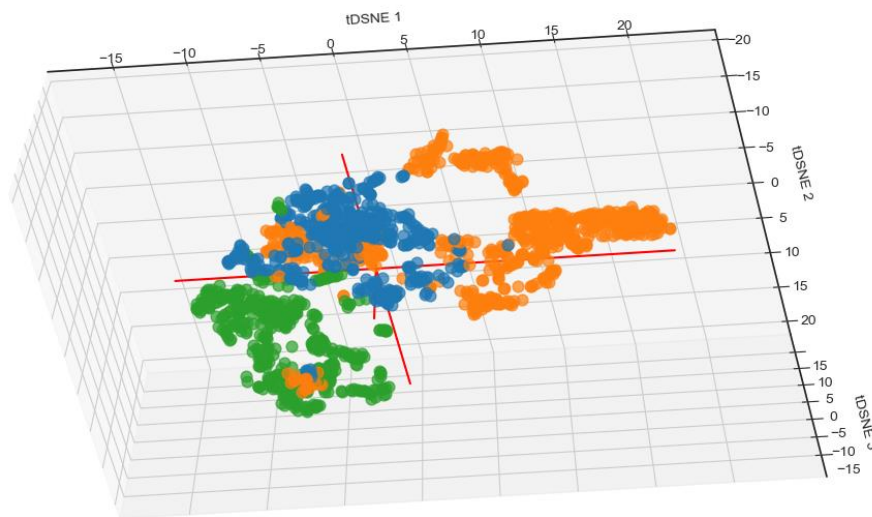
**Figura 94.** Gráfico de SNE en 3 dimensiones utilizando para la etapa de agujereado

Se analizó la etapa de fresado realizando los gráficos en 2 y 3 variables (Figura 95 y Figura 96, respectivamente). Se observan zonas definidas donde predomina una de las

herramientas. Entre los *clusters* de H1 y H3 hay puntos de H2, pero la probabilidad de que se agrupen en dentro del que les corresponde es mucho mayor. Los puntos contenidos en este gráfico para cada uno de los *clusters* se encuentran mucho más concentrados que en el caso de los PC y clasifica de manera más adecuada. Esto se debe al carácter no lineal del algoritmo, lo cual supone una gran ventaja frente al PCA.



**Figura 95.** Gráfico de SNE en 3 dimensiones utilizando para la etapa de fresado.

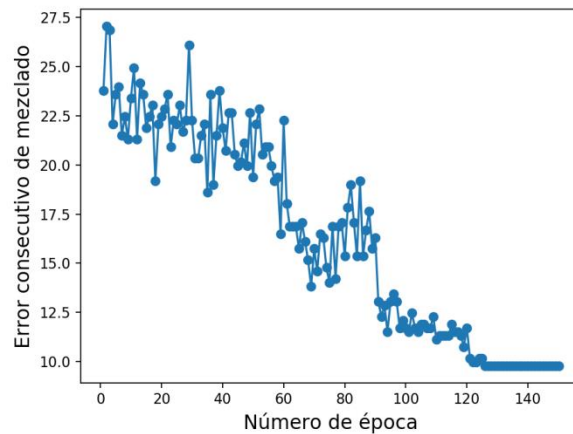


**Figura 96.** Gráfico de SNE en 3 dimensiones utilizando para la etapa de fresado.

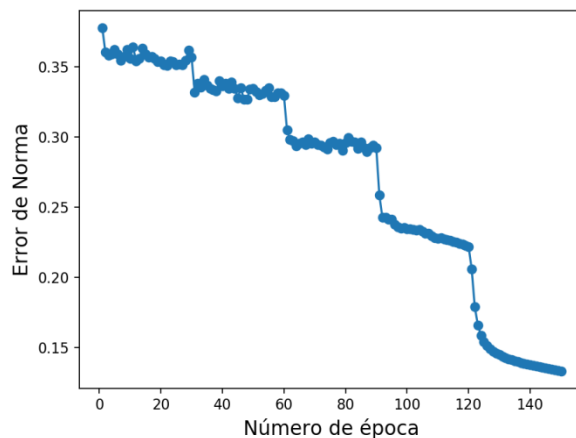
#### 7.2.4. Análisis del desgaste mediante mapas de Kohonen

Para diferenciar el desgaste de las herramientas se utilizó el mapa de Kohonen. Se analizaron los puntos obtenidos en la etapa de agujereado y fresado, utilizando aproximadamente 170 y 500 muestras, respectivamente, para cada condición de la herramienta. Para entrenar la red se utilizaron todos los parámetros de EA, con el objetivo de poder visualizar en los mapas de cada una de las variables cuáles son más relevantes. Se separó un grupo de datos con el objetivo de ser utilizado para la predicción. Éste no debe ser utilizado para el entrenamiento ya que se requieren muestras desconocidas para realizar una predicción que tenga validez.

Se desarrolló un algoritmo que permite visualizar la evolución del error de norma y el error de mezclado dentro del mapa de Kohonen. En primer lugar se analizó el agujereado, entre los intervalos de 0-0,5 s En las Figura 97 y 98 podemos ver ambos gráficos de error de mezclado y norma desarrollados y cómo convergen a 0 a medida que transcurren las épocas.



**Figura 97.** Error consecutivo de mezclado en función del número de épocas.



**Figura 98.** Error de norma en función del número de épocas.

En la Figura 99 se muestra un mapa con menor error de mezclado obtenido mediante el algoritmo desarrollado para la etapa de agujereado. La arquitectura de la red fue:

- **Tamaño de la red (CxR):** 50x50
- **Geometría de la red:** Planar
- **Función topológica de corrección de la vecindad:** Triangular
- **Vecino más cercano:** 13
- **Corrección de pesos máxima y mínima:** 0,9 y 0,1
- **Tipo de neurona ganadora:** Salida más grande
- **Número de épocas:** 400
- **Máximo valor absoluto W:** 0,9
- **Actualización de los pesos:** Por época

Este mapa de entrenamiento no logró distinguir entre H1 y H2. Esto puede deberse al carácter transitorio de la etapa P.

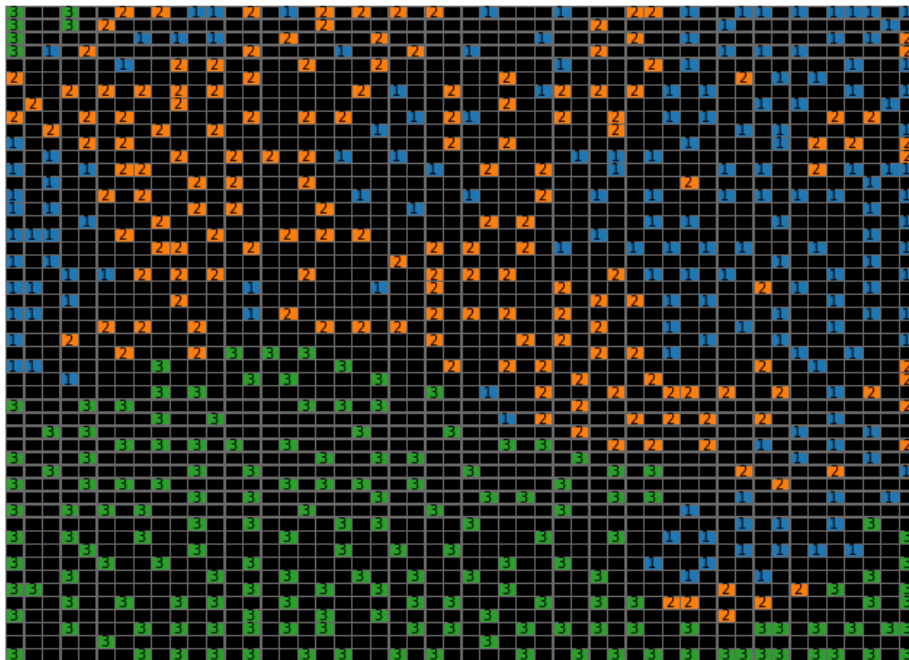
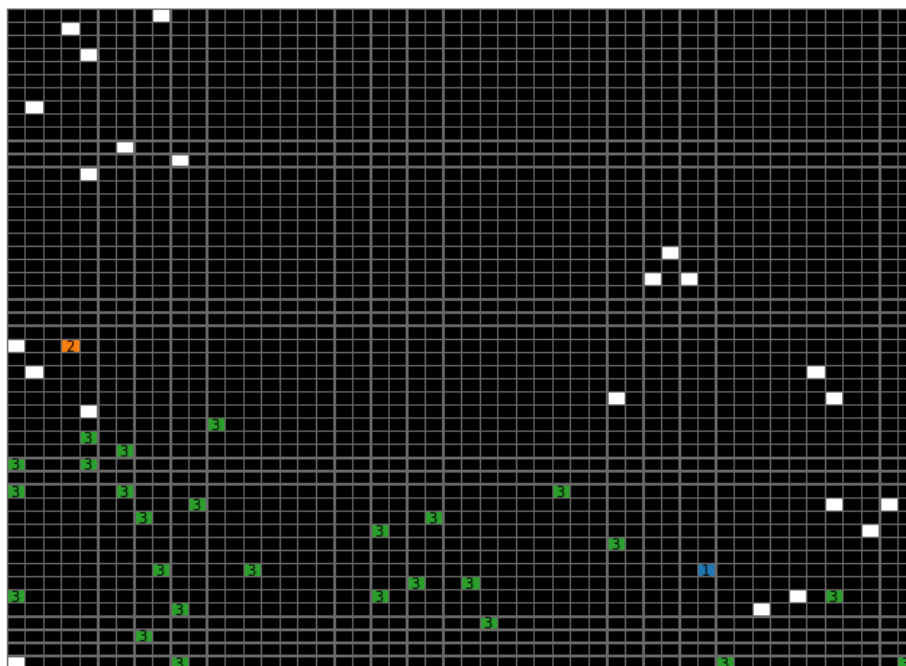


Figura 99. Mapa auto-organizado de entrenamiento para la etapa de agujereado.

Luego se realizó el mapa de predicción de la señal que se puede observar en la Figura 100. En este mapa de predicción hubo un total de 23 desaciertos en las neuronas activas

sobre un total de 50 neuronas que generó la red. Se puede ver cómo la H3 es identificada correctamente y cómo las otras dos herramientas no pueden ser identificadas.



**Figura 100.** Mapa auto-organizado de entrenamiento para la etapa de agujereado.

Posterior al análisis de la etapa P se realizó el de la etapa F utilizando la misma arquitectura que en el caso anterior (Figura 101). Sobre los mapas realizados para la etapa F, se visualizan 3 zonas topológicas que corresponden a los 3 desgastes de las herramientas, logrando separar las tres etapas de manera apreciable, aunque los pesos correspondientes a H2 se filtran en los *clusters* de las otras dos herramientas.

Por otro lado, podemos ver que hay una zona de contacto entre H3 y H2 es mayor que la de H1 y H3, lo cual supone que las primeras tienen mayor grado de similitud que las segundas.

Posteriormente se realizó la predicción utilizando 100 muestras para cada uno de los casos (Figura 102). El grado de desacierto fue de 9 pesos sobre 70 totales calculados por el SOM a partir de los de entrenamiento, lo cual implica un error de aproximadamente 12% en las predicciones. Este es un resultado alentador para la discriminación de los distintos desgastes de las herramientas utilizadas en el corte de paneles tipo sándwich mediante el uso de SOM.

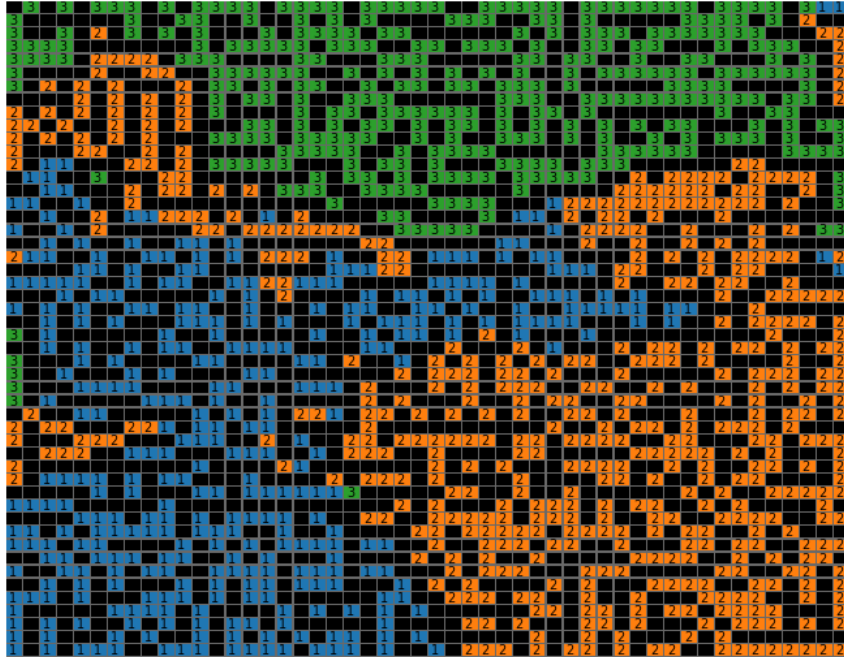


Figura 101. Mapa auto-organizado de entrenamiento para la etapa de fresado.

El análisis mediante los mapas de Kohonen resultó satisfactorio para la etapa F, a diferencia del análisis realizado para la etapa P. Si bien la clusterización de los distintos tipos de desgaste no es total, tiene un grado de separación que le permite predecir de manera correcta los datos de muestras desconocidas. Esto puede deberse no solamente al carácter transitorio de la etapa P, sino a que la etapa F tiene una cantidad de muestras mucho mayor debido a que transcurre en aproximadamente un segundo, el doble que la etapa P.

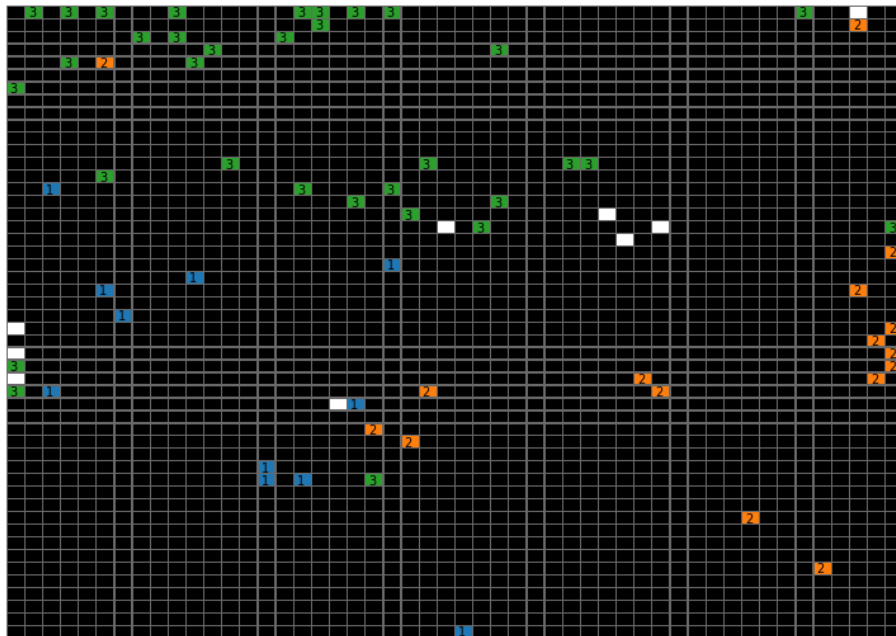


Figura 102. Mapa auto-organizado de entrenamiento para la etapa de fresado.

## Capítulo 8: Conclusiones

En el presente trabajo se estudió el mecanizado de materiales compuestos de uso aeroespacial utilizando la técnica de EA para caracterizar las etapas de mecanizado y el desgaste de las herramientas.

Inicialmente se realizaron mediciones que permitieron caracterizar tres aspectos fundamentales: la velocidad de propagación, la atenuación y la isotropía. Con respecto a la velocidad de propagación, se encontraron resultados muy diferentes dependiendo de la posición de la fuente de EA. El cálculo de la atenuación por pérdidas genuinas permitió conocer cómo se comporta el material en función de la frecuencia, corroborando su incremento con la frecuencia. Esto permitiría realizar correcciones en función de la distancia y el tiempo si se realizara un análisis con las formas de onda de la señal. Por último, se estudió el grado de isotropía para la propagación de ondas elásticas en el material estudiado utilizando el parámetro de EA de Amplitud. Se observó que el comportamiento de las ondas elásticas (la distribución de la energía generada por una fuente monopolar) en el panel era isótropo en el plano, por lo que no se hicieron consideraciones particulares a la hora de realizar los ensayos de mecanizado.

A lo largo del desarrollo del trabajo se realizaron distintos algoritmos en el lenguaje de programación Python que permitieron el acondicionamiento, el procesamiento y la visualización de los datos de EA obtenidos en las mediciones. Particularmente se desarrollaron tres algoritmos que permitieron la *clusterización* de los parámetros de EA (Componentes Principales, Incrustación Estocástica de vecinos y Mapas auto-organizados de Kohonen) mediante una serie de bibliotecas asociadas al lenguaje de programación. Dada la complejidad de los fenómenos analizados y la cantidad de parámetros de la EA fue muy importante la búsqueda de algoritmos que permitan clasificar las señales de EA de manera autónoma.

Se buscó clasificar las etapas del mecanizado mediante los tres algoritmos mencionados previamente. En cuanto al PCA, demostró ser una herramienta efectiva para este tipo de análisis cuando la herramienta no tiene desgaste. Cuando el desgaste es mayor, esta técnica deja de clasificar correctamente las etapas. La SNE resultó ser una técnica muy adecuada para la caracterización de las etapas, maximizando su eficacia al eliminar las transiciones entre las etapas. Por último, se utilizaron los SOM, logrando un agrupamiento aceptable en el mapa de entrenamiento, en el caso de la herramienta nueva y un poco más difuso en el caso de la herramienta desgastada. Los mapas de

predicción en ambos casos tuvieron un error del 15%, el cual se considera que en trabajos a futuros puede ser disminuido de manera significativa.

En cuanto a la clasificación del desgaste de la herramienta, se utilizaron las tres técnicas de reducción dimensional y también se analizó la PM. Para realizar cada uno de los análisis se utilizaron las etapas de agujereado y de fresado dado que son las más representativas del mecanizado. Los algoritmos resultaron ineficientes en general cuando se analizó la etapa de agujereado, posiblemente, debido a la alta transitoriedad del fenómeno.

Para la etapa F se logró diferenciar el desgaste en cada uno de los análisis realizados. En el caso de la PM, se pudo observar que a mayor desgaste de la herramienta, los parámetros MPPM y VPPM de la EA decrecen de manera significativa. En el caso del PCA se puede observar que, si bien hay cierto grado de mezcla, se pueden diferenciar zonas donde predomina claramente una herramienta o la otra. La SNE permitió separar las distintas herramientas, aunque con un cierto mezclado de parte de H2 sobre las otras herramientas. Por último se realizó el análisis del desgaste de las herramientas mediante los SOM. Se seleccionó el mapa con mejor agrupamiento de los datos, permitiendo observar zonas claras donde primaban ciertas herramientas sobre las otras. Luego se realizó un mapa de predicción con 100 muestras de cada caso de desgaste (300 en total) y se obtuvieron 70 neuronas de las cuales 61 eran correctas, representando un error de aproximadamente 12%, el cual es un promisorio para continuar con el desarrollo de las redes. Este método de análisis utilizando los SOM resulta más ventajoso que las otras técnicas utilizadas ya que se ve en su totalidad en dos dimensiones y permite visualizar de manera clara el agrupamiento de los datos, siendo a la vez muy fácil de interpretar.

## Trabajo a futuro

En cuanto a la caracterización de los paneles utilizando EA:

- Caracterizar la isotropía del material en función de la frecuencia utilizando las formas de onda de EA.
- Utilizar otros métodos para el cálculo de la velocidad que permitan obtener un valor más preciso a lo largo de todo el panel

En cuanto a las mediciones de mecanizado:

- Cuantificar el desgaste de la herramienta
- Ampliar los casos de estudio variando la velocidad de avance y rotación de la herramienta, así como el espesor del material utilizado.
- Diseñar un experimento que permita prescindir de las normalizaciones de los datos (generando una probeta tipo y una posición del sensor única).
- Realizar termografías sobre el proceso de corte con las distintas herramientas, para evaluar cuánto y cómo cambia el gradiente de temperaturas del panel en función del desgaste.
- Realizar otros algoritmos de agrupamiento de datos que sean más veloces y permitan clasificar mejor los distintos casos de las herramientas.

## Referencias

[Allen, 1969] Allen, H. G. (1969). Analysis and design of structural sandwich panels. Pergamon Press.

[Asamene, 2015] Asamene, K., Hudson, L., & Sundaresan, M. (2015). Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels. *Ultrasonics*, 59, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.01.016>

[Ascher, 1999] D. Ascher, P. F. Dubois, K. Hinsien, J. Hugunin, and T. Oliphant, “NumPy: Numerical,” 1999. Consultado en línea el 03-05-2017: <http://http://www.numpy.org>

[ASTM, E1316-10a] Standard Terminology for Nondestructive Examinations. Technical report, ASTM International, 2010.

[Arola] Arola, D. (1996). Chip formation graphite / epoxy in orthogonal composite trimming of, 27(2), 121–133.

[Benmedakhene, 2001] Benmedakhene, S., & Laksimi, A. (2001). Propagation study of Acoustic Emission waves in Composite Materials. In Thirteenth international conference on composite materials. Beijing.

[Bitzer, 1997] Bitzer, T. (1997), Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing.

[Çelik, 2015] Çelik, A., Lazoglu, I., Kara, A., & Kara, F. (2015). Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites. *Wear*, 338–339, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.05.009>

[Davies, 2001] Davies, J. M. (2001). Lightweight sandwich construction (MPG Books). Manchester: Blackwell Science.

[Einasto, 2011] Einasto, M., Saar, E., Einasto, J., Tempel, E., & Tago, E. (2011). Principal component analysis, 1–13.

[Folguera, 2015] Folguera, L., Zupan, J., Cicerone, D., & Magallanes, J. F. (2015). Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems Self-organizing maps for imputation of missing data in incomplete data matrices. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 143, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.03.002>

[García-Reiriz, 2011] García-Reiriz, A., Magallanes, J., Zupan, J., & Liberman, S. (2011). Artificial neural networks to evaluate the boron concentration decreasing profile in

Blood-BPA samples of BNCT patients. *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 1793–1795.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.02.055>

**[Girsang, 2015]** I. P. Girsang, T. B. Circle, and J. S. Dhupia (2015). *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*.

**[Gómez, 2015]** Gómez, M. P. (2015). *Fundamentos de la Emisión Acústica*.

**[Grosse, 2008]** Grosse, C. U. (2008). *Acoustic Emission Testing*. *Acoustic Emission Testing*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9>.

**[Heaton, 2012]** Heaton, J. (2012). *Introduction to the math of neural networks*. (WordsRu.co, Ed.). Chesterfield: Heaton Research Inc.

**[Hinton, 2002]** Hinton, G., & Roweis, S. (2002). Stochastic Neighbor Embedding. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 15, 833-840.

**[Hocheng, 1990]** Hocheng, H. Dharang, CKH (1990). Delamination during drilling in composite laminate. *Trans ASME J Eng Ind*, 112, 236-239.

**[Hocheng, 2012]** Hocheng, H. (Ed.). (2012). *Machining technology for composite materials, principles and practice*. Woodhead Publishing Limited.

**[IRAM NM-302, 2012]** IRAM 779:2012 / NM 302, “Ensayos no destructivos. Ensayo de emisión acústica (EA)- Terminología”.

**[Jolliffe, 2002]** Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis, Second Edition*. Springer.

**[Jones, 1999]** Jones, R. M. (1999). *Mechanics of Composite Materials*, 2<sup>nd</sup> Ed, Taylor & Francis, Philadelphia

**[Kullback, 1951]** Kullback, S., & Leibler, R. A. (1951). On Information and Sufficiency. *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(1), 79–86.  
<https://doi.org/10.1214/aoms/1177729694>

**[Lammering, 2018]** Lammering, R., Gabbert, U., Sinapius, M., Schuster, T., & Wierach, P. (2018). Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49715-0>

**[Lopresto, 1999]** Lopresto, V., Santo, L., Caprino, G., & De Iorio, I. (1999). Effect of fibre orientation on cutting forces and cut quality in machining unidirectional carbon fibre reinforced plastics. *Proceedings of the IV Conv. AITEM*, 451-454.

**[Lopresto, 2001]** Lopresto, V. Santo, L. Caprino, G. et al (2001) Mechanisms of chip generation in orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced plastics. Proc Prime2001, Italy

**[Kalpakjian, 2009]** Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2009). Manufacturing Engineering and Technology (6th ed.). Prentice Hall.

**[Liu, 2012]** Liu, D., Tang, Y., & Cong, W. L. (2012). A review of mechanical drilling for composite laminates. Composite Structures, 94(4), 1265–1279. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>

**[Maaten, 2008]** Maaten, L. Van Der, & Hinton, G. (2008). Visualizing Data using t-SNE, 9, 2579–2605.

**[Magallanes, 2011]** Magallanes, J., García-Reiriz, A., Liberman, S., & Zupan, J. (2011). Kohonen classification applying ‘ missing variables ’ criterion to evaluate the p - boronophenylalanine human-body- concentration decreasing profile of boron neutron capture therapy patients. Journal of Chemometrics, (January), 340–347. <https://doi.org/10.1002/cem.1383>

**[Matplotlib, 2018]** “Python Plotting - Matplotlib 2.2.3 Documentation.” Matplotlib: Python Plotting - Matplotlib 2.2.3 Documentation, 2018, [matplotlib.org/](http://matplotlib.org/).

**[Nijssen, 2015]** Nijssen, L. (2015). Composite Materials an introduction (1o). Inholland University of Applied Sciences.

**[Ohtsu, 1984]** M. Ohtsu y K. Ono (1984), J. Acoustic Emission, 3, 27-40.

**[PAC, 2007]** Physical Acoustics Corporation, “PCI-2 Based AE System. User`s manual: Rev 3”, Princeton Junction, NJ.

**[Pandas, 2018]** “Python Data Analysis Library” Pandas: Powerful Python Data Analysis Toolkit - Pandas 0.23.4 Documentation, [pandas.pydata.org/](http://pandas.pydata.org/).

**[Pedregosa, 2011]** Pedregosa, F., Weiss, R., & Brucher, M. (2011). Scikit-learn : Machine Learning in Python, 12, 2825–2830.

**[Philbin, 2005]** Philbin, P., & Gordon, S. (2005). Characterisation of the wear behaviour of polycrystalline diamond (PCD) tools when machining wood-based composites, 163, 665–672. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.085>

**[Priddy, 2005]** Priddy, K. L., & Keller, P. E. (2005). *Artificial Neural Networks, An Introduction*. Washington: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers All.

**[Prosser, 1995]** Prosser, W. H., Jackson, K. E., Kellas, S., Smith, B. T., Mckeon, J., & Friedman, A. (1995). Advanced , Waveform Based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites, 53(9), 1052–1058.

**[Ramirez, 2014]** Ramirez, C., Poulachon, G., Rossi, F., & Saoubi, R. M. (2014). Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. *Procedia CIRP*, 13, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.028>

**[Ramulu, 1991]** Ramulu, M., Faridnia, M., Garbini, J. L., & Jorgensen, J. E. (1991). Machining of graphite/epoxy composite materials with polycrystalline diamond (PCD) tools. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 113(4), 430-436.

**[Sause 2011]** Sause M., “Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources”, *Journal of Acoustic Emission*, vol. 29, pp. 184-196.

**[Sandvik, 2019]** "CoroMill® Plura Fresas optimizadas para composite", [Online]. Disponible:<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/es-es/c-1040-184.pdf>. [Fecha de acceso: 30- Jan- 2019].

**[Shaw, 2005]** Shaw, M. C. (2005). *Metal cutting principles (Second Edition)*. Oxford University Press.

**[Sheikh, 2009]** Sheikh-Ahmad, J. (2009). *Machining of Polymer Composites*. Abu Dhabi: Springer. <https://doi.org/9780387686196>

**[Thomsen, 2005]** Thomsen, O. T., & Bozhevolnaya, E. (Eds.). (2005). *Sandwich Structures 7 : Advancing with Sandwich Structures and Materials*. Aalborg: Springer.

**[Yoon, 2008]** Yoon, D. (2008). *Fundamentals of Acoustic Emission*.

# Apéndice A: Desarrollo de la interfaz e EA para el análisis de señales

## A.1. Manejo de los datos

### A.1.1. Parámetros de EA

Para la adquisición de datos de EA se utilizó una placa de adquisición de *Physical Acoustic Corporation* (PAC) PCI-2 y su Software AEWIn. Esta placa permite obtener los 3 modos de adquirir señales de EA: sus parámetros, las formas de onda y el formato de señal continua o *Streaming*, con una frecuencia de muestreo de hasta 40 MHz y una resolución de 18 bits. El programa AEWIn registra los datos en el formato DTA, el cual se encuentra comprimido y encriptado por lo que el acceso directo a la placa resulta difícil, pero el software permite exportar los parámetros de EA y sus formas de onda a formato de texto.

Para poder operar y procesar los datos de los archivos de texto en la plataforma Python, se utilizó la biblioteca Pandas [Pandas, 2018]. Esta biblioteca permite acceder a archivos de texto y tratarlos como *Dataframes*, objetos que asemejan a una hoja de datos, donde cada columna tiene su nombre. Este módulo llamado **Manejo de Parámetros**, prepara los archivos de texto para que luego sean manipulados.

### A.1.2. Formas de onda

Por otro lado, se realizó un objeto que permite trabajar con las Formas de Onda de un hit de EA. AEWIn permite exportar a un archivo de texto solamente el valor de tensión eléctrica de la forma de onda. Esta señal tiene un encabezado que explicita el nombre del archivo DTA del cual fue exportado, la fecha y la hora, el intervalo de muestreo, las unidades en las que fue medido, el número de canal y de hit y, por último, el tiempo al cual fue tomado este hit (Figura 1). Para construir el objeto denominado **Forma de onda**, se utilizó el intervalo de muestreo y para una cantidad de muestras determinada, es posible obtener el vector de datos ‘Tiempo’ de la forma de onda (FO).



```
HNP_1_38893667.txt - Notepad
File Edit Format View Help
SOURCE FILE NAME: C:\Documents and Settings\AE\Desktop\EA Sandwich Augusto\Medicion Mecanizado Placa 20180601\HNP.DTA
DATE: Friday, June 01, 2018
TIME: 11:19:54
SAMPLE INTERVAL (Seconds): 0.0000002000
UNITS: volts
CHANNEL NUMBER: 1
HIT NUMBER: 1
TIME OF TEST: 38.8936677500

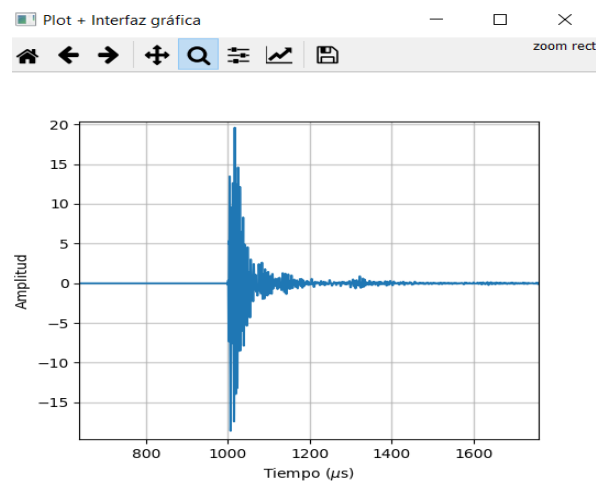
-0.01220703
-0.00915527
-0.00610352
-0.00305176
0.00000000
0.00305176
0.00305176
0.00305176
0.00305176
0.00000000
```

Figura 1: Archivo de texto que contiene la forma de onda de un hit de EA

## A.2. Módulo de gráficos

Para realizar el módulo de gráficos se utilizó Matplotlib, una biblioteca que permite graficar vectores de datos obtenidos a partir de la biblioteca Numpy [Ascher, 1999] y de formar objetos con características de vectores de datos [Matplotlib, 2018]. Este módulo tiene la capacidad de mostrar el gráfico, hacer aumento de la imagen, guardar, y cambiar algunos parámetros y el nombre de sus ejes.

**Objeto Gráfico de Forma de Onda:** En primer lugar, se realizó un objeto sencillo que permite obtener la señal en función del tiempo a partir del objeto que contiene la Forma de Onda de un hit, obteniéndose un gráfico como se observa en la Figura 2.

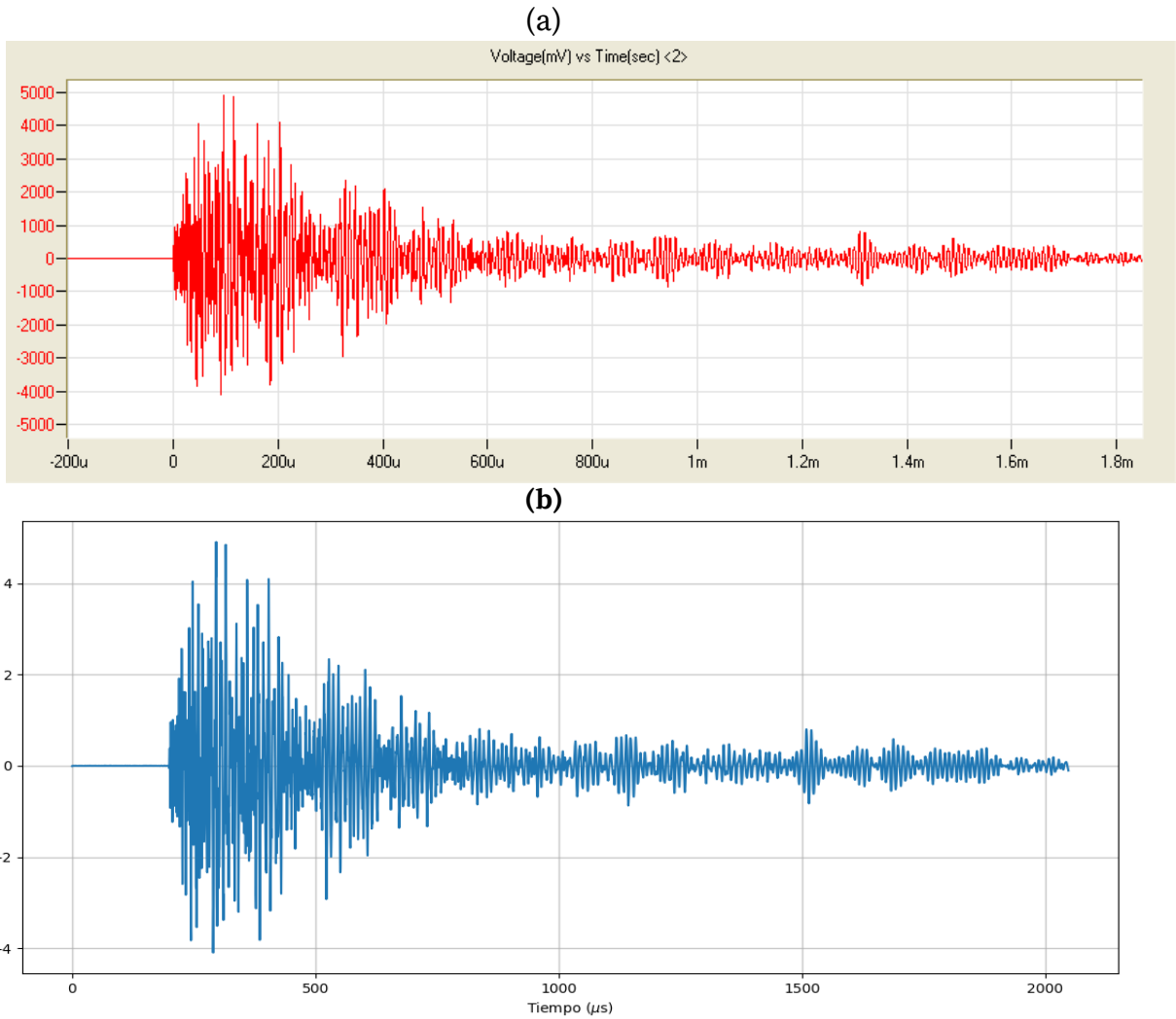


**Figura 2.** Gráfico de la Forma de Onda de un hit en función del tiempo.

En la Figura 3 partes (a) y (b) se muestran los gráficos producidos con el software comercial AEWin y con el software desarrollado en este trabajo, respectivamente.

Luego, se buscó realizar un objeto que permitiera la interacción del usuario con el gráfico para seleccionar los hits de EA deseados. Entonces, se desarrollaron dos tipos de gráficos, heredando los atributos y métodos del gráfico de puntos de genérico desarrollado por Matplotlib.

**Objeto Parámetros de EA:** Para mejorar la manera de trabajar con los parámetros de EA, se realizó una clase que permite, además de obtener los vectores de datos y graficarlos, seleccionar un conjunto de puntos a partir un de método que fue llamado *Lazo*. En la Figura 4 se exhibe cómo se puede seleccionar un conjunto de datos con el cursor quedando marcados con un color distinto. Con este tipo de gráficos, se puede seleccionar un conjunto de hits de EA y aplicar el mismo procesamiento de señales a cada uno. Debido a su método principal, este objeto fue llamado **Gráfico Lazo**.



**Figura 3.** Gráfico de la Forma de Onda de un hit en función del tiempo. (a) Software PAC AEWIn. (b) Software desarrollado en este trabajo.

También se desarrolló un objeto que permite al usuario elegir un único punto, describiendo sus coordenadas X e Y, denominado **Gráfico Interactivo** y se puede observar en la Figura 5

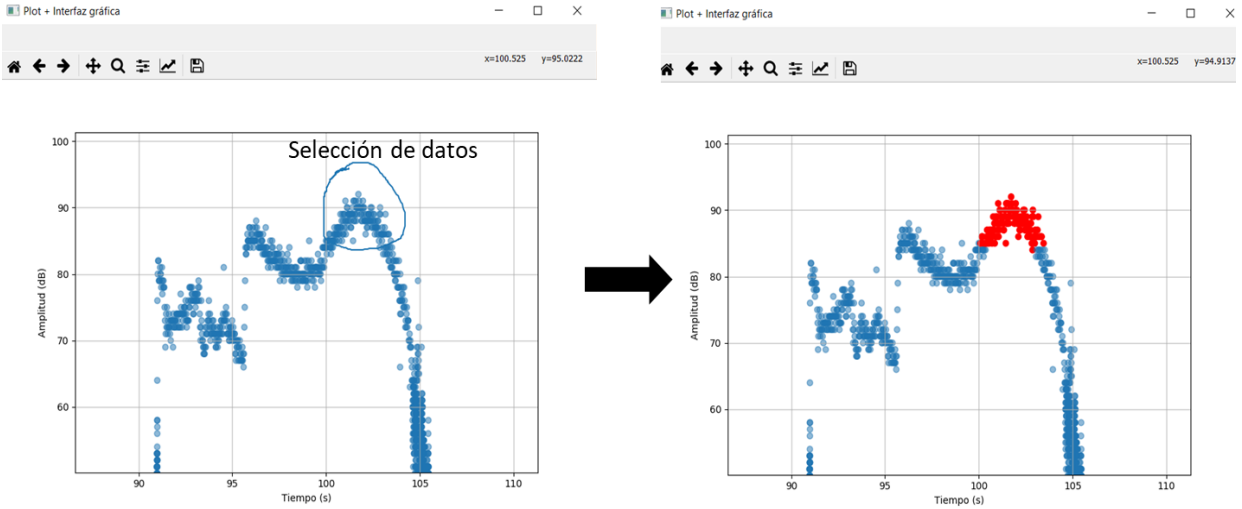


Figura 4. Gráfico que permite la selección de datos para método Lazo.

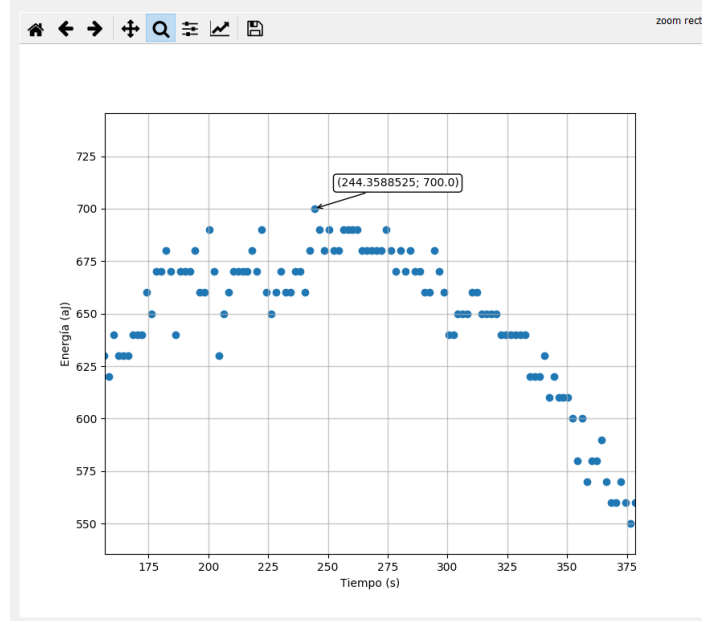


Figura 5. Gráfico interactivo que permite la selección de un punto describiendo sus coordenadas.

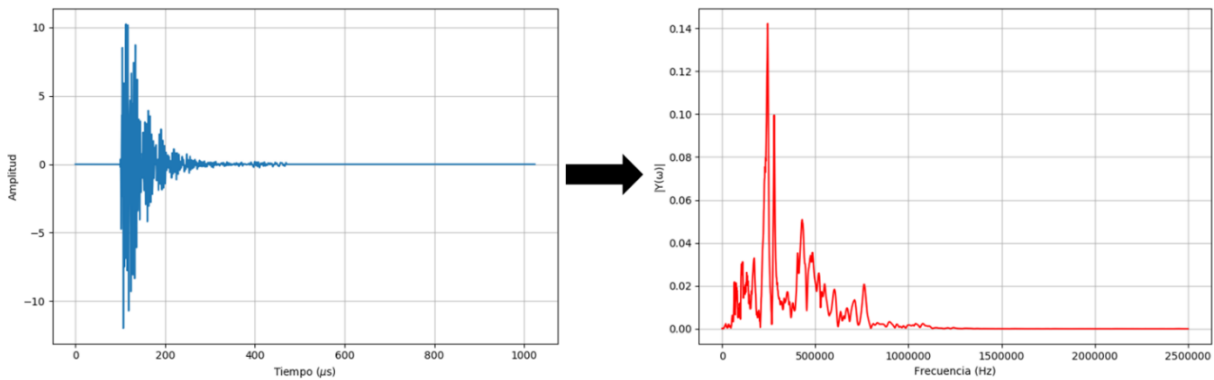
### A.3. Procesamiento de las formas de onda

En esta sección se describen los procesamientos realizados a las formas de onda de EA. Por simplicidad, se agregan los gráficos desarrollados para cada uno en esta sección.

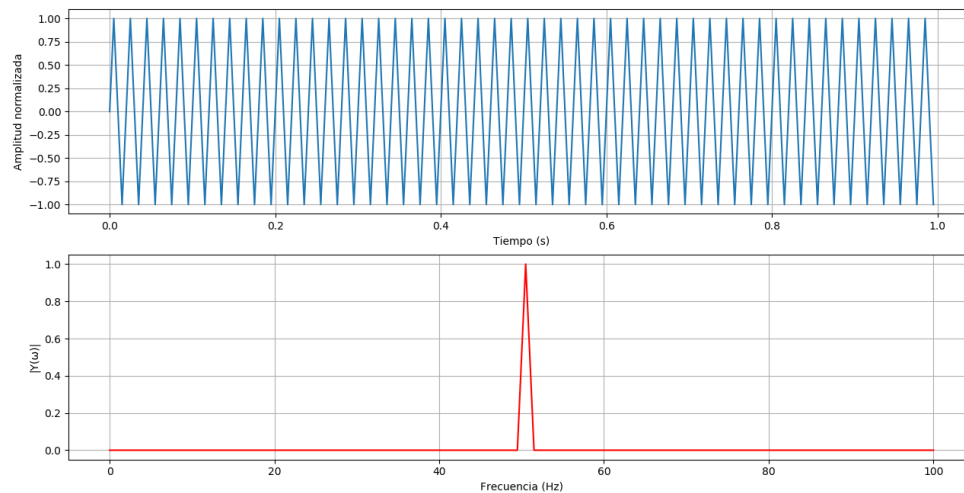
#### A.3.1. Implementación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Se realizó un objeto que obtiene la FFT, introduciendo el número de muestras que tendrá el gráfico (usualmente denominado N), y la frecuencia de muestreo a partir de la biblioteca Scipy, basada en Numpy. En la Figura 6 se muestra el pasaje del dominio temporal al espectral de una forma de onda de un hit de EA.

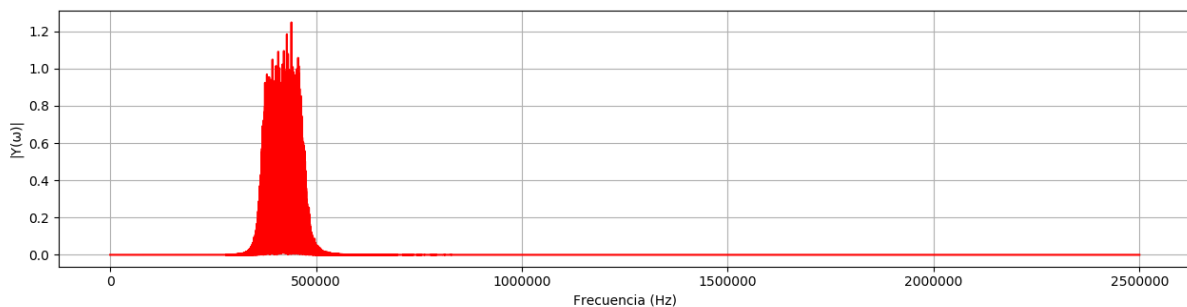
Para probar que el algoritmo funcione de manera correcta, se realizaron una serie de pruebas. En primer lugar, se utilizaron tonos puros (Figura 7) y luego se utilizó ruido blanco y un filtro pasabanda (centrado en una frecuencia de 420 kHz), como se puede observar en la Figura 8.



**Figura 6.** Pasaje de la señal temporal a la FFT de la señal.



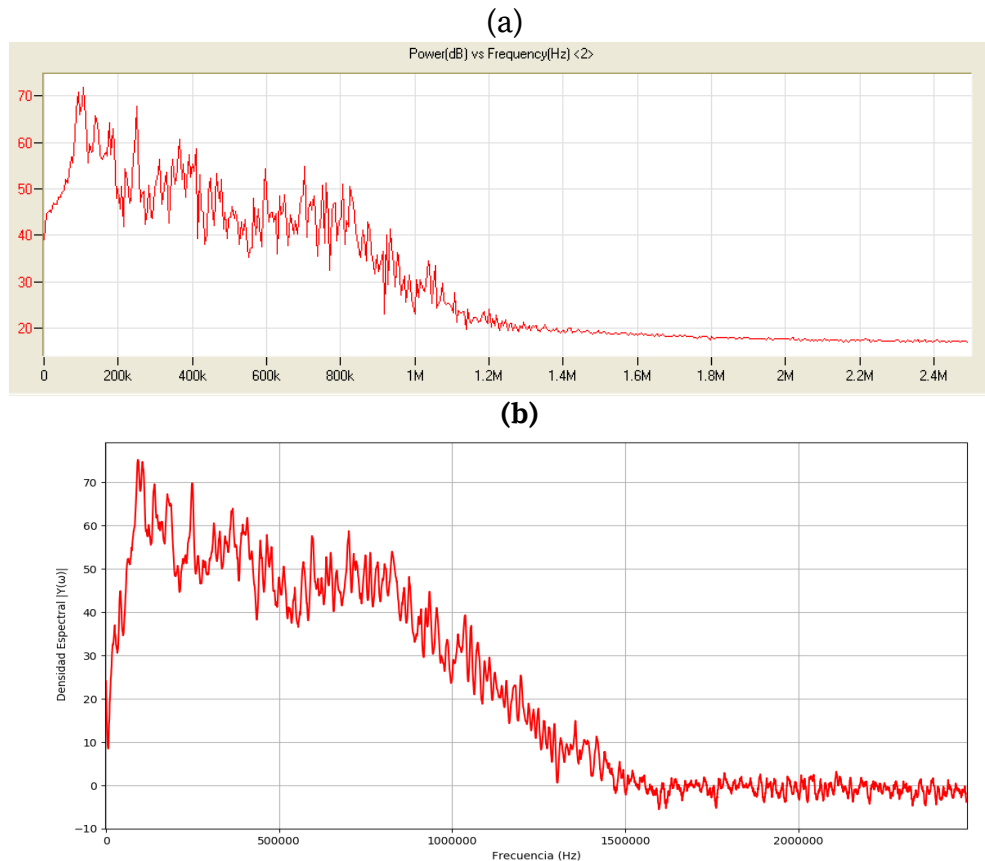
**Figura 7.** Transformada de Fourier de un tono puro.



**Figura 8.** Transformada de Fourier de ruido blanco filtrado en 420 kHz.

Por último, se comparó el gráfico de FFT con el del programa AEwin. En la Figura 9 se puede observar que, si bien no son idénticas, se inspeccionaron visualmente los picos de ambos

gráficos para constatar que las componentes espectrales de mayor relevancia (es decir, en el rango de 20kHz a 1MHz) son las mismas para ambos gráficos.

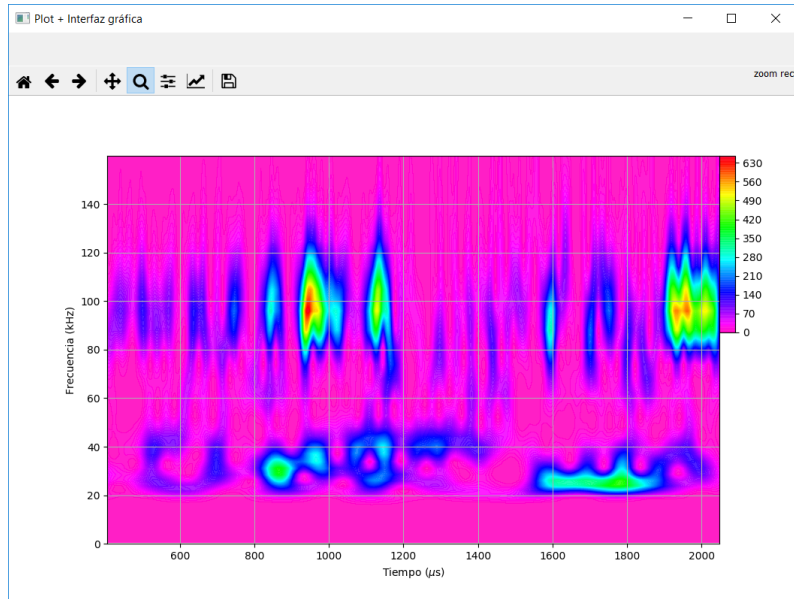


**Figura 9.** Gráfico de la Forma de Onda de un hit en función del tiempo.

### A.3.2. Implementación de la Transformada de Onditas (TO)

Para poder observar la intensidad del contenido espectral en función del tiempo se desarrolló la TO a partir del módulo llamado ‘Wavelets’. Este módulo permite (a partir de la frecuencia de muestreo de la señal, el tiempo y el vector de datos) obtener la TO utilizando la Ondita Madre Morlet, Paul, Gaussiana o Ricker. Para aplicar la TO a las Formas de Onda de EA se optó por utilizar la Ondita Madre Morlet tal como se recomienda en [Suzuki, 1996]. En la Figura 10 se puede ver la TO de una señal de EA utilizando Ondita Madre Morlet.

Para probar que las señales obtenidas por el algoritmo son fiables, se utilizó el mismo procedimiento que en el caso anterior, un tono puro y el ruido blanco filtrado. En la Figura 11 se pueden ver las pruebas realizadas con el tono puro.



**Figura 10.** Gráfico de la Transformada Ondita para una señal de EA continua.

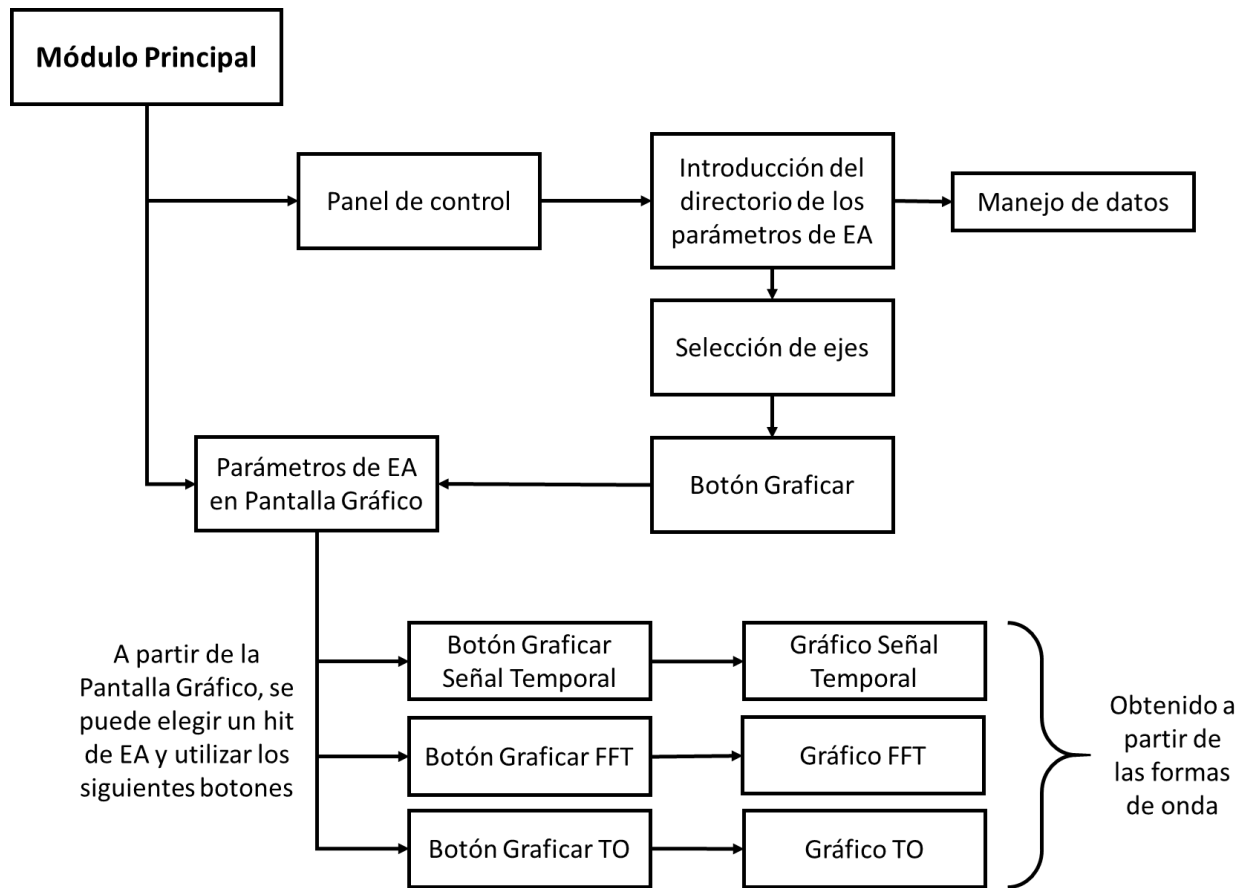


**Figura 51.** Transformada Ondita para un tono puro (arriba). Tono puro en el dominio temporal (abajo).

#### A.4. Desarrollo de la interfaz de usuario

La Interfaz de Usuario fue desarrollada mediante el paradigma de Programación Orientado a Objetos y una arquitectura Modelo-Vista-Presentador (MVP) [Potel, 1996] [Yang Zhang, 2010], por lo que las funcionalidades se encuentran desacopladas, permitiendo utilizar los módulos en otras aplicaciones o extender la funcionalidad del programa. La realización de la interfaz gráfica

fue mediante la librería Pyside, diseñada para crear interfaces, permitiendo acceso al *framework*<sup>2</sup> Qt. En la Figura 12 se muestra un diagrama de flujo del programa realizado.



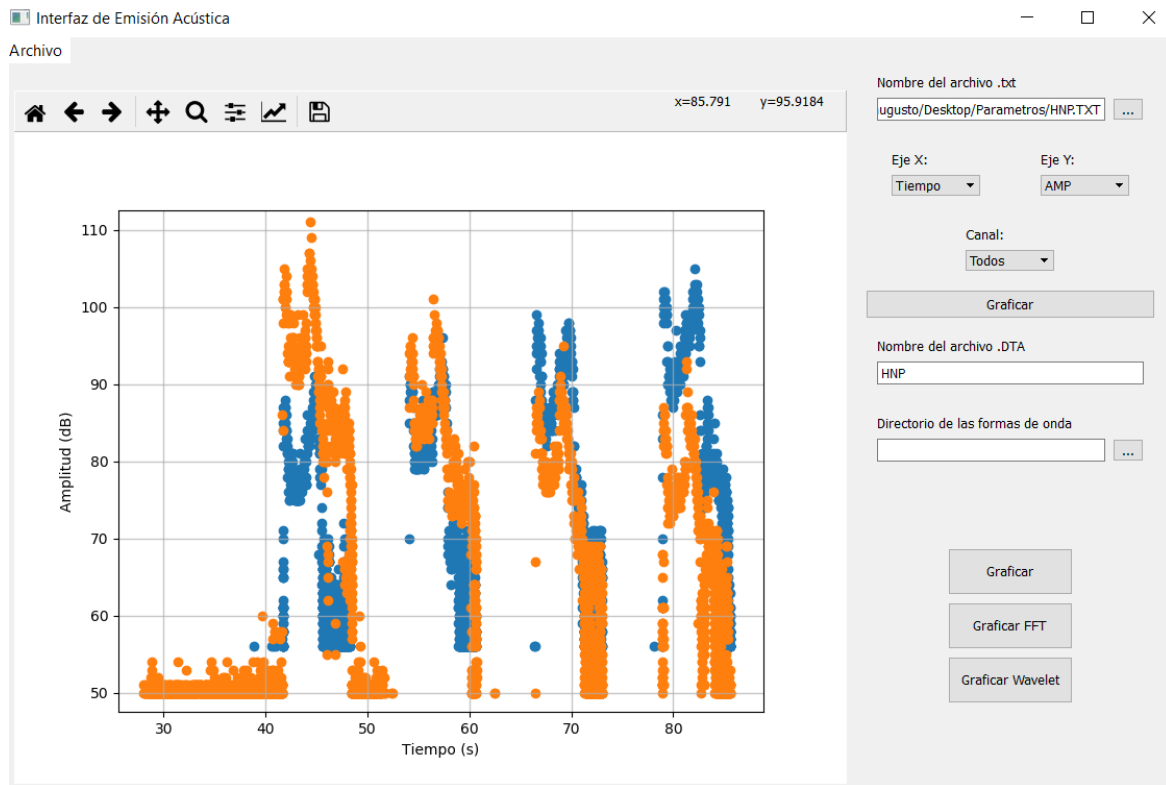
**Figura 62.** Diagrama en bloques que representa el funcionamiento de la arquitectura MVP.

En este programa se acoplaron los módulos desarrollados en las secciones anteriores: el módulo de Manejo de Parámetros, el módulo de Gráfico Interactivo y todos los módulos de procesamiento de datos para visualizar la forma de onda en el dominio temporal, espectral (FFT) y su TO.

El programa se ejecuta mediante el Módulo Principal (ver Figura anterior), el cual inicializa los objetos Panel de Control y Pantalla Gráfico de Parámetros de EA. En el Panel de Control, el programa permite obtener los parámetros de EA a partir de un archivo de texto, obtenido por el programa AEWIn – PAC<sup>®</sup>, a partir del módulo de manejo de datos. Luego, llena las listas desplegables con los parámetros que se encuentran disponibles en el archivo, permitiendo al usuario elegir los ejes del gráfico y también el canal de EA que se desee observar (Figura 13). Al

<sup>2</sup> Se entiende por *Framework* a una estructura destinada a servir como soporte o guía para la construcción de algo. En informática, el framework es una estructura en capas que indica qué tipos de programa pueden construirse y cómo se interrelacionan.

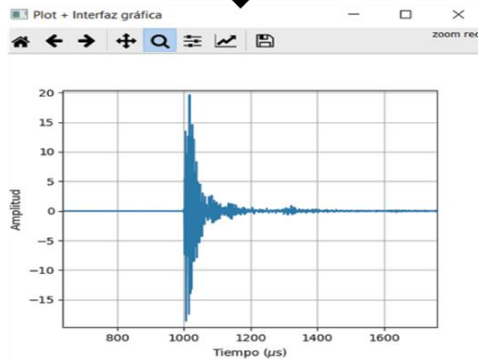
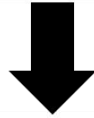
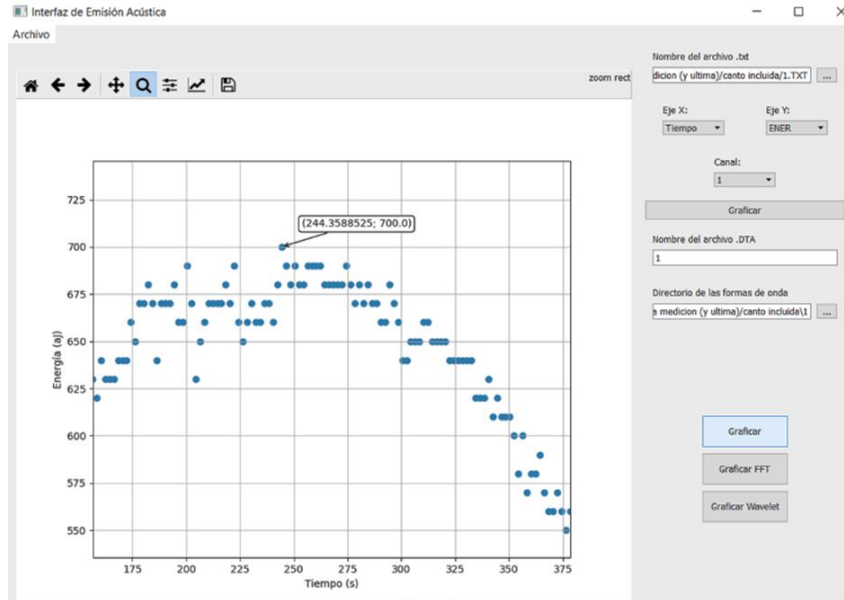
presionar el botón ‘Graficar’ se graficarán los parámetros seleccionados previamente en el objeto Gráfico Interactivo.



**Figura 73.** Esquemático de la interfaz gráfica y cada uno de sus módulos.

El usuario puede seleccionar un hit dentro de los parámetros de EA para poder conocer el valor de las coordenadas X e Y. A su vez, puede colocar el prefijo del archivo de la forma de onda y seleccionando el hit a partir de los parámetros<sup>3</sup>, visualizar la forma de onda, la FFT o la Transformada Ondita. En la Figura 103 se puede apreciar como a partir de la selección de un hit de EA, se puede obtener la forma de onda (obtenida a partir del Software AEWIn).

<sup>3</sup> Si el nombre del archivo de los parámetros coincide con el nombre de una carpeta que contenga las formas de onda, se completará de manera automática.



**Figura 84.** Obtención de la forma de onda de la señal a partir de un hit de EA.

Se realizó una comparación con el Software AEWIn. El software de EA presentado en este trabajo permite la selección de un hit en particular de EA, mientras que en AEWIn no se pueden observar hits previos, ya que no permite seleccionar algún punto de los gráficos o retroceder manualmente. Esto representa una ventaja del Software desarrollado ya que permite poder ver la forma de onda de un determinado hit de EA.

Por otro lado, el diseño minimalista del software de EA realizar permite visualizar todos los parámetros y todos los canales en una sola ventana permitiendo cambiarlos en la pantalla principal (Figura 15). En cambio, para AEWIn se requiere ingresar a una pantalla en particular que permite variar canal y el parámetro que se desea visualizar (Figura 16).

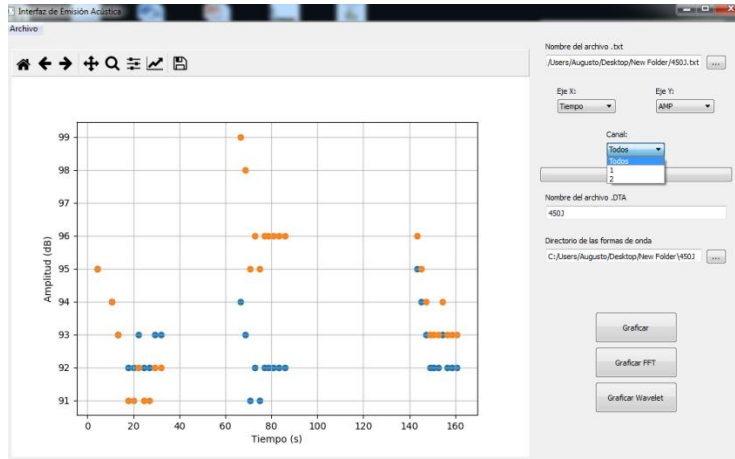


Figura 95. Visualización de los parámetros de EA mediante el software desarrollado.

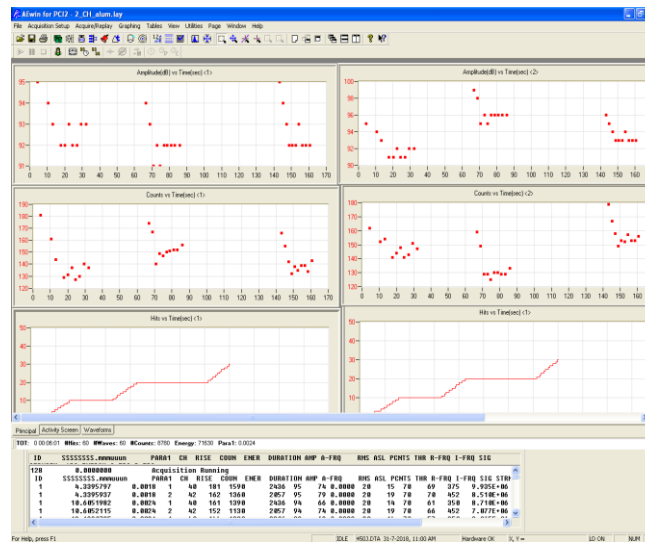


Figura 16. Visualización de los parámetros de EA mediante el software AEWin.